
MBL/WHOI
0 0301 0004171 1

Handwörterbuch der Naturwissenschaften.

Neunter Band.

Handwörterbuch
der
Naturwissenschaften

Herausgegeben von

Prof. Dr. E. Korschelt-Marburg (Zoologie)

Prof. Dr. G. Linck-Jena (Mineralogie und Geologie)

Prof. Dr. F. Oltmanns-Freiburg (Botanik)

Prof. Dr. K. Schaum-Leipzig (Chemie)

Prof. Dr. H. Th. Simon-Göttingen (Physik)

Prof. Dr. M. Verworn-Bonn (Physiologie)

Dr. E. Teichmann-Frankfurt a. M. (Hauptredaktion)

Neunter Band

Selenologie — Transformatoren

Mit 988 Abbildungen



JENA
Verlag von Gustav Fischer
1913

Inhaltsübersicht.

Nur die selbständigen Aufsätze sind hier aufgeführt. Eine Reihe von Verweisungen findet sich innerhalb des Textes und ein Sachregister am Schluß des 10. Bandes gibt nähere Auskunft.

S.

(Fortsetzung.)

Seite

Selenologie oder Mondkunde. Von Dr. F. Sacco, Prof., Turin 1
Semper, Karl. Von Dr. W. Harms, Priv.-Doz., Marburg i. H. 12
Senarmont, Henri Hureau de. Von Dr. K. Spangenberg, München 13
Senebier, Jean. Von Dr. W. Ruhland, Prof., Halle a. S. 13
Serveto, Miguel. Von Dr. J. Pagel, weil. Prof., Berlin 13
v. Siebold, Karl Theodor Ernst. Von Dr. W. Harms, Priv.-Doz., Marburg i. H. . 13
v. Siemens, Ernst Werner. Von E. Drude, Göttingen 14
Silikate. Von Dr. K. Endell, Halensee 14
Silurformation. Von Dr. F. Herrmann, Priv.-Doz., Marburg i. H. 18
Sinnesorgane. Anatomie der Sinnesorgane. Von Dr. R. Hesse, Prof., Berlin-Frohnau 31
— Physiologie der Sinnesorgane. Von Dr. A. Pütter, Prof., Bonn 82
Sipunculidea. Von Dr. J. W. Spengel, Prof., Gießen 97
Skelett der Tiere. Wirbellose und Wirbeltiere. Von Dr. A. Hase, Priv.-Doz., Jena 106
Skraub, Zdenko Hans. Von Dr. E. von Meyer, Prof., Dresden 153
Smith, William. Von Dr. O. Marschall, Eisenach 153
Snell (Snellius van Roijen), Willebrord. Von E. Drude, Göttingen 153
Sohnke, Leonhard. Von E. Drude, Göttingen 153
Soleil, Jean Baptiste François. Von E. Drude, Göttingen 154
Sömmering, Samuel Thomas. Von E. Drude, Göttingen 154
Sonnensystem. Von Dr. O. Knopf, Prof., Jena 154
Sorby, Henry Clifton. Von Dr. K. Spangenberg, München 172
Sowerby, James. Von Dr. O. Marschall, Eisenach 172
Sozialanthropologie. Von Dr. E. Fischer, Prof., Freiburg i. Br. 172
Spallanzani, Lazaro, Von Dr. W. Harms, Priv.-Doz., Marburg i. H. 188
Spaltpflanzen. Schizophyta. Von Dr. F. Oltmanns, Prof., Freiburg i. Br. und Dr. H. Miehe, Prof., Leipzig 188
Speichel. Von Dr. A. Noll, Prof., Jena 196
Spektralanalyse. Qualitative Spektralanalyse. Von Dr. H. Konen, Prof., Münster i. W. 205
— Quantitative Spektralanalyse und Kolorimetrie. Von Dr. H. Krüß, Hamburg . . 214
Spektroskopie. Von Dr. H. Konen, Prof., Münster i. W. 222
Sperma. Spermien oder Spermatozoen, Spermiogenese (Samenbildung). Von Dr. E. Ballowitz, Prof., Münster i. W. 251
Sphärolithe. Von Dr. G. Linck, Prof., Jena 281
Spirochäta. Spironemacea. Von Dr. R. Gonder, Frankfurt a. M. 284
Spitzenentladungen. Von Dr. G. Leithäuser, Prof., Hannover 291
Sporozoa. Von Dr. C. Tönniges, Prof., Marburg i. H. 304
Sprengel, Kurt Polykarp Joachim. Von Dr. W. Ruhland, Prof., Halle a. S. . 344
Sprengel, Christian Konrad. Von Dr. W. Ruhland, Prof., Halle a. S. 345
Sproß. Von Dr. M. Raciborski, Prof., Krakau 345
Spruce, Richard. Von Dr. W. Ruhland, Prof., Halle a. S. 379
Stachelhäuter. Echinodermata. Von Dr. S. Becher, Priv.-Doz., Gießen 379
— Paläontologie. Von Dr. J. F. Pompeckj, Prof., Tübingen 457

Seite

Stahl, Georg Ernst. } Von Dr. E. von Meyer, Prof., Dresden 492
Stas, Jean Servais. } 492
Statistik. Von Dr. M.v.Laue, Prof., Zürich 492
Steenstrup, Johann Japetus Smith. Von Dr. W. Harms, Priv.-Doz., Marburg i. H. 500
Stefan, Josef. Von E. Drude, Göttingen 501
Stegocephalen. Von Dr. Fr. Frhr. von Huene, Prof., Tübingen 501
v. Stein, Friedrich R. Von Dr. W. Harms, Priv.-Doz., Marburg i. H. 508
Steinheil, Carl August. Von E. Drude, Göttingen 509
Stelzner, Alfred Wilhelm. } Von Dr. K. Spangenberg, München 509
Steno, Nikolaus . . . . } 509
Stereoskopie. Von Dr. L. Heine, Prof., Kiel 510
Stevin (Stephanus), Simon. Von E. Drude, Göttingen 520
Stickstoffgruppe 520
a) Stickstoff. Von Dr. J. Gewecke, Priv.-Doz., Bonn 520
b) α) Phosphor. } 538
β) Arsen. } Von Dr. A. Stirm, Leipzig 578
γ) Antimon. } 594
c) α) Wismut. . } 609
β) Vanadium. } Von Dr. W. Herz, Prof., Breslau 615
γ) Niob. . . } 619
δ) Tantal. . . } 622
Stickstoffverwertung. Von Dr. K. Arndt, Charlottenburg 624
Stimme und Sprache. Von Dr. P. v. Grützner, Prof., Tübingen 629
Stöchiometrie. Von Dr. K. Drucker, Prof., Leipzig 668
Stoffwechsel. Allgemeine Physiologie des Stoffwechsels. Von Dr. A. Pütter, Prof., Bonn 680
— Spezielle Physiologie der tierischen Stoffwechsels. Von Dr. B. Schöndorff, Prof., Bonn 704
— Stoffwechsel der Pflanzen. Von Dr. W. Benecke, Prof., Charlottenburg . . . 727
Stohmann, Friedrich. Von Dr. E. von Meyer, Prof., Dresden 756
Stokes, George Gabriel. Von E. Drude, Göttingen 756
Stoß. Von Dr. Ph. Frank, Prof., Prag 756
Strahlende Aetherenergie. Von Dr. W. Voigt, Prof., Göttingen 763
Strahlung. Wärmestrahlung. Von Dr. O. Lummer, Prof., Breslau 769
— Thermodynamik der Strahlung. Von Dr. M.v.Laue, Prof., Zürich 789
Strahlungserregung. Von Dr. J. Stark, Prof., Aachen 796
Strahlungsmessung. Von Dr. F. Kurlbaum, Prof., Berlin 801
Strahlungsumformungen. Von Dr. R. Ladenburg, Priv.-Doz., Breslau 809
Stratigraphie. Von Dr. Otto Wilckens, Prof., Straßburg i. E. 821
Strecker, Adolf. Von Dr. E. von Meyer, Prof., Dresden 822
Stroboskopische Methoden. Von Dr. P. Spies, Prof., Posen 822
Strömungsströme und Elektrophorese. Von Dr. A. Coehn, Prof., Göttingen . . 834
Sturm, Jakob. Von Dr. W. Ruhland, Prof., Halle a. S. 843
— Jakob Karl Franz. Von E. Drude, Göttingen 843
Stützsubstanzen. Von Dr. A. Hase, Priv.-Doz., Jena 843
Substitution. Von Dr. W. Borsche, Prof., Göttingen 853
Süßstoffe. Von Dr. J. Lifschitz, Leipzig 857
Süßwasserfauna. Von Dr. R. Lauterborn, Prof., Ludwigshafen a. Rh. 861
Swammerdam, Jan. Von Dr. W. Harms, Priv.-Doz., Marburg i. H. 920
Sylvius, Franciscus de le Boë. Von Dr. J. Pagel, weil. Prof., Berlin 920
Symbiose. 920
a) Tier und Alge. Tier und Tier. Von Dr. A. Reichensperger, Priv.-Doz., Bonn 920
b) Flechten. Von Dr. W. Nienburg, Berlin-Frohnau 929
c) Zusammenleben von höheren Pflanzen mit Pilzen und Bakterien. Von Dr. H. Burgeff, München 941
Sympathisches Nervensystem. Von Dr. F. W. Fröhlich, Prof., Bonn 958
Synthese. Von Dr. J. Schmidt, Prof., Stuttgart 968
— Elektrosynthese. Von Dr. C. Schall, Prof., Leipzig 981
System der Pflanzen. Von Dr. R. v. Wettstein, Prof., Wien 987
Systematik und Nomenklatur. Anorganische Verbindungen. Von Dr. K. Schaum, Prof., Leipzig und Dr. W. Böttger, Prof., Leipzig 995
— Organische Verbindungen. Von Dr. J. Lifschitz, Leipzig 1006

T.

Seite
Tait, Peter Guthrie. . . . . } Von E. Drude, Göttingen 1015
Talbot, William Henry Fox. } 1015
Tardigrada. Von Dr. F. Richters, Prof., Frankfurt a. M. 1015
Teer. Von Dr. A. Sander, Ingenieur, Karlsruhe i. B. 1020
Telegraphie. Von Dr. F. Breisig, Prof., Berlin 1024
Telephonie. Von Dr. F. Breisig, Prof., Berlin 1038
Terpene. Von Dr. F. A. Kötz, Prof., Göttingen 1052
Tertiärformation. Von Dr. A. Steuer, Prof., Darmstadt 1077
Thénard, Ludwig Jakob. Von Dr. E. v. Meyer, Prof., Dresden 1097
Thermochemie. Von Dr. W. A. Roth, Prof., Greifswald 1097
Thermometrie (einschließlich Pyrometrie). Von Dr. W. Meißner, Charlottenburg 1128
Thiedemann, Friedrich. Von Dr. W. Harms, Priv.-Doz., Marburg i. H 1147
Thio- und Sulfoverbindungen. Von Dr. Th. Posner, Prof., Berlin 1148
Thomsen, Julius. Von Dr. E. v. Meyer, Prof., Dresden 1168
Thomson, Sir Charles Wyville. Von Dr W. Harms, Priv.-Doz., Marburg i. H. . . 1169
Thomson, Sir William (Lord Kelvin). Von E. Drude, Göttingen 1169
Thomson, Thomas. Von Dr. E. v. Meyer, Dresden 1170
Thuret, Gustave Adolphe. Von Dr. W. Ruhland, Prof., Halle a. S. 1170
Tiefseefauna. Von Dr. J. Meisenheimer, Prof., Jena 1170
Tiemann, Ferdinand. Von Dr. E. v. Meyer, Prof., Dresden 1187
Tierpsychologie. Von Dr. Ed. Claparède, Prof., Genf 1187
Tierstaaten und Tiergesellschaften. Von Dr. H. E. Ziegler, Prof., Stuttgart . . 1204
Tierstöcke. Von Dr. E. Korschelt, Prof., Marburg i. H. 1220
Tierstoffe unbekannter Konstitutionen. Von Dr. H. Liebermann, Berlin 1229
Tinte. Von Dr. W. Hinrichsen, Prof., Berlin 1233
Titanmineralien. Von Dr. A. Ritzel, Priv.-Doz., Jena 1235
Tod. Von Dr. M. Verworn, Prof., Bonn 1237
Toepler, August Joseph Jgnaz. Von E. Drude, Göttingen 1243
Toluolgruppe. 1243
A. Einleitung. . . . . } Von Dr. K. Schaum, 1243
B. Aromatische Verbindungen mit gesättigten Seitenketten. } Prof., Leipzig 1244
C. Aromatische Kohlenwasserstoffe mit ungesättigten Seitenketten. Von Dr. Joh. Scheiber, Priv.-Doz., Leipzig 1246
Tonsysteme. Von Dr. A. v. Oettingen, Prof., Leipzig 1252
Torrel, Otto Martin. Von Dr. O. Marschall, Eisenach 1267
Torricelli, Evangelista. Von E. Drude, Göttingen 1267
Tourenzahlmesser. Von Dr. F. Göpel, Prof., Charlottenburg 1267
Tournefort, Joseph Pitton de. Von Dr. W. Ruhland, Prof., Halle a. S. 1271
Transformatoren. Von Dr. H. Busch, Göttingen 1272



S.

(Fortsetzung.)

Selenologie oder Mondkunde.

1. Historisches über die Mondforschung. 2. Die wichtigsten astronomischen Daten. 3. Die Mondoberfläche. 4. Die Evolution des Mondes.

Erklärung der selenologischen Karte.

Bei der schematischen selenologischen Karte wurden nur die hauptsächlichsten Ringe verzeichnet. Wegen der geringen Dimensionen der Karte wurden die Ringe im allgemeinen als sekundäre Formationen gefärbt, obgleich mehrere von diesen noch in der tertiären Zeit aktiv gewesen sein mögen. Allerdings ist diese Unterscheidung nicht immer leicht.

Bei den Furchen (von welchen nur die größeren bezeichnet wurden) sind wir manchmal unsicher hinsichtlich ihrer Trennung von den typischen Brüchen. Die Brüche und Verwerfungen kann man nicht immer von den Runzellinien unterscheiden, um so mehr als die letzteren manchmal ganz nahe an den ersteren und sogar mit ihnen verbunden sind.

In den Zeichen der Verwerfungen entspricht die gezähnte Seite der Richtung des Absinkens.

Die Abgrenzung der primären, sekundären und tertiären Gegenden ist oft ungewiß wegen ihrer Abstufungen, Uebergänge, Ueberschiebungen usw. Die punktierte, gabelförmige Linie westlich von Copernicus entspricht nicht einer Furche, sondern einer im Text besprochenen Linie von Löchern. Unter den Ausbrüchen, welche besonders in der quartären Zeit erfolgten, haben wir nur die bedeutendsten durch einen einfachen Stern bezeichnet, der keine Beziehung zu der Ausbreitung des Strahlenkranzes hat.

Im Rande der Mondscheibe wurden diejenigen „Maria" gezeichnet, welche nur während einiger Phasen sichtbar sind.

Der Maßstab der schematischen Schnitte durch die bedeutendsten Becken des Mondes ist verschieden. In denselben wurde von der Wölbung der Lithosphäre des Mondes abstrahiert.

Erklärung der Abkürzungen, die in der selenologischen Karte gebraucht wurden.

C. = Caucasus.
H. = Haemus.

L. M. = Lacus Mortis.
L. S. = Lacus Somniorum.

M. A. = Mare Anguis.
M. AU. = Mare Australe.
M. C. = Mare Crisium.
M. FAE. = Mare Faecunditatis.
M. FR. = Mare Frigoris.
M. HU. = Mare Humboltianum.
M. H. = Mare Humorum.
M. IMBR. = Mare Imbrium.
M. M. = Mare Marginis.
M. N. = Mare Nectaris.
M. NO. = Mare Novum.
M. NU. = Mare Nubium.
M. O. = Mare Orientale.
M. S. = Mare Spumans.
M. SE. = Mare Serenitatis.
M. SM. = Mare Smythii.
M. T. = Mare Trans Haan.
M. TR. = Mare Tranquillitatis.
M. U. = Mare Undarum.
M. V. = Mare Vaporum.

OC. PR. = Oceanus Procellarum.

P. P. = Palus Putredinis.
P. S. = Palus Somnii.

S. A. = Sinus Aestuum.
S. I. = Sinus Iridum.
S. M. = Sinus Medii.
S. R. = Sinus Roris.

A. = Aliacensis.
Ab. = Abenezra.
Ab. = Abulfeda.
Ag. = Agrippa.
Al. = Alphonsus.
Alb. = Albategnius.
Alm. = Almanon.
Alp. = Alpetragius.
Ar. = Arzachel.
Ara. = Arago.
Arc. = Archimedes.
Arch. = Archytas.
Ari. = Aristillus.
Aris. = Aristoteles.
Arist. = Aristarchus.
At. = Atlas.

B. = Bacon.
Bai. = Bailly.
Be. = Bessel.
Bi. = Bianchini.
Bil. = Billy.
Bl. = Blancanus.
Bo. = Bond.
Bou. = Bouillaud.
Bu. = Burg.

C. = Cassini.
Cal. = Calippus.
Cap. = Capella.
Capu. = Capuanus.
Cat. = Catharina.
Ci. = Cyrillus.
Cl. = Clairaut.
Cla. = Clavius.
Cle. = Cleomedes.
Co. = Conon.
Co. = Copernicus.
Col. = Colombo.
Cu. = Curtius.
Cuv. = Cuvier.

De. = Delambre.
Di. = Dionysius.
Dop. = Doppelmayer.

E. = Eudoxus.
Er. = Eratosthenes.
Es. = Endymion.
Eu. = Eulero.

Fa. = Fabricius.
Fi. = Firmicus.
Fl. = Flamsteed.
Fou. = Fourier.
Fr. = Fracastoro.
Fra. = Franklin.
Fr. M. = Fra Mauro.
Fu. = Furnerius.

G. = Gemma Frisius.
Ga. = Gassendi.
Go. = Godin.
Gr. = Grimaldi.
Gu. = Guerike.
Gut. = Guttenberg.

H. = Herschel.
Hanst. = Hansteen.
Har. = Harpalus.
He. = Hell.
Hei. = Heinzel.
Hel. = Helicon.
Her. = Hercules.
Her. = Herodotus.
Hes. = Hesiodus.
Hev. = Hevel.
Hi. = Hipparchus.
Hip. = Hippalus.
Hy. = Hyginus.

J. = Janssen.
J. C. = Julius Caesar.
J. H. = Herschel.

K. = Kies.
Ke. = Kepler.
Kr. = Krüger.

L. = Licetus.
La. = Lacaille.
La. = Lagrange.
Lal. = Lalande.
Lan. = Langrenus.
Lan. = Landesberg.
Let. = Letronne.
Lev. = Leverrier.
Li. = Linné.
Lil. = Lilius.
Lin. = Lindenau.
Lo. = Longomontanus.
Lu. = Lubiniesky.

M. = Maurolycus.
Ma. = Maginus.
Mä. = Mädler.
Mac. = Macrobius.
Mai. = Mairan.
Man. = Manlius.
Man. = Mansinus.
May. = Mayer.
Me. = Menelaus.
Mer. = Mercator.
Mers. = Mersenius
Mes. = Messier.
Met. = Metius.
Meto. = Meton.
Moe. = Moesting.
Mor. = Moretus.
Mu. = Mutus.

O. = Orontius.

P. = Purback.
Pa. = Pallas.
Pe. = Petavius.
Ph. = Phocylides.
Pi. = Pitiscus.
Pic. = Picard.
Picc. = Piccolomini.
Pit. = Pitatus.
Pl. = Playfair.
Pla. = Plato.
Pli. = Plinius.
Pol. = Polybius.
Pos. = Posidonius.
Pr. = Proclus.
Pt. = Ptolemaeus.

R. = Regiomontanus.
Ra. = Rabbi Levi.
Rein. = Reinhold.
Rh. = Rheticus.
Rhe. = Rheita.
Ri. = Riccioli.

S. = Stöfler.
Sa. = Sacrobosco.
Sch. = Scheiner.
Schi. = Schiller.
Schik. = Schikard.
Sh. = Sharp.
St. = Steinheil.
Ste. = Stevinus.

T. = Thebit.
Ta. = Tarantius.
Th. = Theon.
The. = Theophilus.
Ti. = Timocharis.
Ty. = Tycho.
Tr. = Triesnecker.

V. = Vlacq.
Ve. = Vendelinus.
Vi. = Vitellus.

W. = Werner.
Wa. = Walther.
War. = Wargentin.
Wi. = Wilhelm I.
Z. = Zagut.
Za. = Zach.

1. Historisches über die Mondforschung. Der Mond war von jeher Gegenstand der Beobachtung von seiten der Menschen und zwar hauptsächlich wegen seiner relativen Nähe zur Erde, seiner leichten Wahrnehmbarkeit und seiner charakteristischen Phasen. Auch der Urmensch trieb, wie es der Wilde noch heute tut, einen besonderen Kultus mit dem Monde und alle Völker des Altertums beschäftigten sich mit ihm. Ueberreste der alten empirischen Beobachtung sind die zahlreichen Märchen und abenteuerlichen Meinungen aller Art, welche zum Teil noch heute den menschlichen Geist beschäftigen, so daß man zum Beispiel noch in unseren Tagen an einen merklichen Einfluß des Mondes auf irdische Ereignisse glaubt.

Dies ist ja allerdings übertrieben, hat aber dennoch teilweise eine tatsächliche Grundlage. Es genügt hierbei an das

Entwurf einer selenologischen Karte nebst schematischen Schnitten durch die Lithosphäre des Mondes. Von F. Sacco.

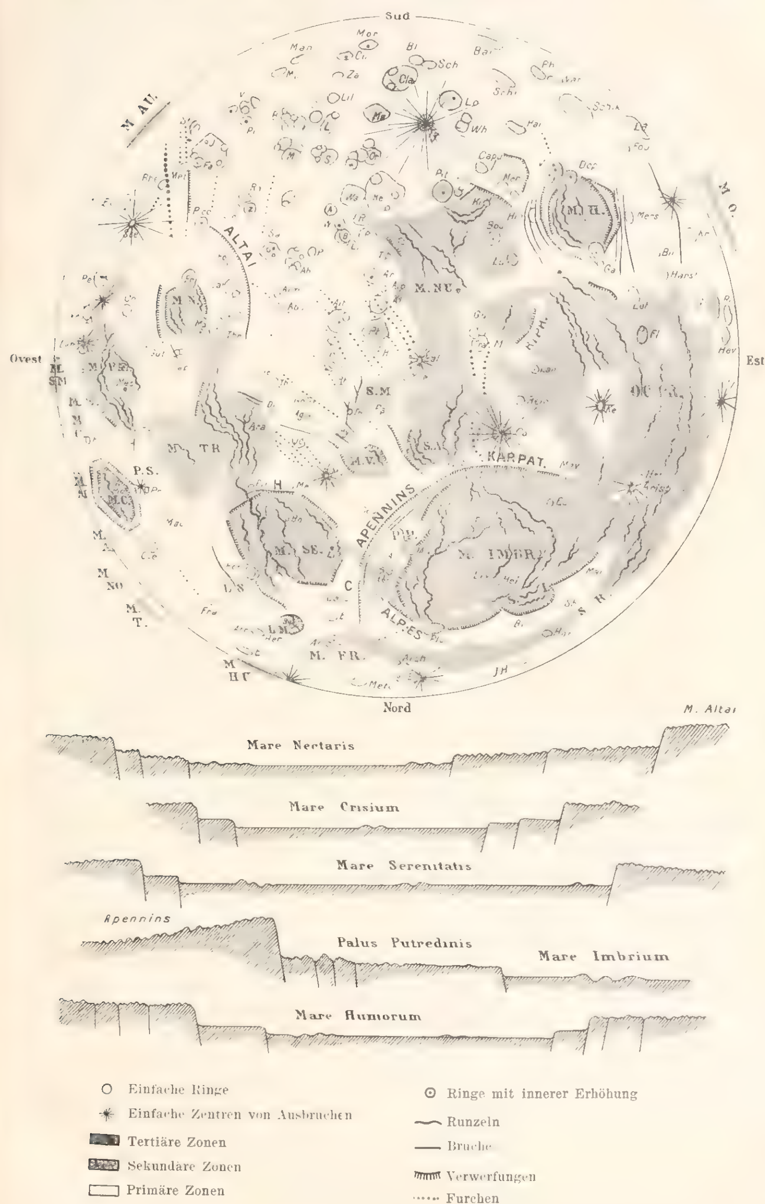


Fig. 1.

Phänomen der Gezeiten zu erinnern. Eingehende Beobachtungen über den Mond wurden ebenso wie über die größeren Gestirne im allgemeinen schon von den Gelehrten des Altertums, von Priestern und anderen gemacht, so z. B. zur Zeit der babylonischen Herrschaft, zu Zeiten der Perser, bei den Indiern und Chinesen, so daß es vor mehr denn 4000 Jahren schon möglich war, eine Mondfinsternis vorherzusagen, und auch die Zeiteinteilung des Altertums in Monate und Wochen sich an die Mondphasen anschloß.

Unter den Selenologen, deren Namen uns die Geschichte überliefert hat, nennen wir: Anaxagoras, der schon den Mond als eine Art Erde mit Bergen und Tälern zu betrachten pflegte, Demokrit, Philolaos, Meton, von denen der letztere im 5. Jahrhundert vor Christus den Mondzyklus sehr genau beschrieb. Aristoteles bewies sogar schon 400 Jahre vor unserer Zeitrechnung die Kugelgestalt unseres Trabanten. Aristarch maß 100 Jahre später seinen Durchmesser und seine Entfernung von der Erde, und seine Zahlen fanden eine genauere Bestimmung wiederum 100 Jahre später durch Hipparch, der auch die Neigung seiner Bahn mit größerer Genauigkeit bestimmte. Ein Jahrhundert ~~vor~~ unserer Zeitrechnung entdeckte Ptolemäus die wesentlichsten Unregelmäßigkeiten der Mondbahn und nach ihm schrieb Plutarch eine Art Monographie über den Mond.

In den folgenden fünfzehn Jahrhunderten zeigte die Lehre vom Monde keine Fortschritte, ebensowenig wie die übrigen Wissenschaften, aber kurz nachdem Tycho am Ende des 16. Jahrhunderts in den Bewegungen des Mondes neue Variationen entdeckt hatte, eröffnete ~~der berühmte~~ Galilei mit seinem Teleskop dem Studium der Selenologie ein neues und ungeahntes Feld. Unter anderem stellte er im Jahre 1610 die erste skizzenhafte Mondkarte her, maß trigonometrisch die Höhe verschiedener Berge des Mondes und entdeckte ihre Libration in der Breite. Auf Galilei folgte Schlag auf Schlag eine große Anzahl Gelehrter, die sich mit dem Studium unseres Himmelskörpers befaßten. Wir nennen von ihnen: Lagalla, Scheiner, Fontana, Mellan, De Rheita, Gassendi, Sirsalis. Bedeutendere selenologische Arbeiten hinterließen: Van Langren oder Langrenus, welcher auf seiner Mondkarte den verschiedenen Punkten die Namen berühmter Persönlichkeiten gab; Hevelius von Danzig, der nicht nur die Libration des Mondes in der Länge entdeckte, sondern auch in seiner Abhandlung über ihn vom Jahre 1647 die erste ausführliche Generalkarte der Mondoberfläche herstellte, auf der er etwa 250 Punkte beschrieb und mit Namen benannte, die er der Geographie entlehnt hatte, was natürlicherweise zu Verwirrungen und Unordnung Veranlassung gab. Kurze Zeit danach veröffentlichte Riccioli von Bologna mit der Hilfe von Grimaldi im Jahre 1651 eine neue, viel genauere Mondkarte und benutzte für deren Nomenklatur Namen berühmter Astronomen und Mathematiker, die in der Folge allgemein angenommen wurden, so daß von Hevelius nur wenige Namen mehr übrig blieben, wie z. B. Maria, Alpen, Apenninen und einige andere. Eine andere große Mondkarte verdanken wir Hooke und Cassini; sie erschien im Jahre 1680.

Außer diesen selenographischen Arbeiten wurden aber auch wichtige theoretische Forschungen über die Bewegungen des Mondes angestellt, so z. B. von Newton. Nachdem dieser in seinen „Principia" vom Jahre 1687 das Gesetz der universellen Gravitation aufgestellt hatte, wendete er es bei seinen Studien über den Mond an. Auch andere ausgezeichnete Mathematiker wie Euler, d'Alembert, Clairault, Lalande, Halley, Lagrange, Laplace, Plana und De Launay hinterließen uns interessante selenographische Studien, die nun in ununterbrochener Reihenfolge fortgesetzt wurden. Auch gab T. Mayer in Göttingen im Jahre 1775 eine neue Mondkarte heraus und einige Jahre später stellte Schröter in seinen Selenographischen Fragmenten die Lehre vom Mond auf eine wahrhaft wissenschaftliche Basis. Sein großes Werk erschien 1791 und 1802 in 2 Bänden; darin finden wir die Oberfläche bis in die kleinsten Details beschrieben. Wir finden Angaben über die Ausmaße der Berge, griechische und römische Lettern bezeichnen zahlreiche Punkte der Mondoberfläche und eine große Anzahl neu entdeckter Einzelheiten werden mit neuen Namen benannt. Es ist hinsichtlich dieser Nomenklatur zu bemerken, daß späterhin ein Komitee der „British Association" versuchte, ein neues rationelles System einzuführen, das aber eine allgemeine Annahme nicht fand.

Einen großen Fortschritt in der Mondforschung bedeuten die Studien von Gruithuisen und ganz besonders von Lohrmann, welcher im Jahre 1824 die Gebiete des Mondes in spezieller Weise illustrierte. Noch wichtiger waren die umfassenden selenographischen Studien von Beer und Mädler vom Jahre 1837, deren Arbeiten erst im Jahre 1860 in einer illustrierten Auflage erschienen. Im Jahre 1878 veröffentlichte F. I. Schmidt als Resultat seiner etwa 35jährigen Arbeit auf verschiedenen Observatorien eine neue Mondkarte, auf welcher mit peinlicher Genauigkeit etwa 32000 Ringwälle und Krater und etwa

1000 Brüche unterschieden werden konnten. Weniger bedeutungsvoll waren selenographische Forschungen von Birth (1872), Nasmyth und Carpenter (1874 bis 1884), Neisen (1876), Elger (1895), Franz, Fauth und anderen.

In der neueren Zeit wurde mit der Photographie eine neue überaus wichtige Methode in das Studium des Mondes eingeführt. Es war nun möglich, die stets mehr oder weniger subjektiven Handzeichnungen durch die objektiven photographischen Bilder zu ersetzen. Die ersten Versuche, den Mond zu photographieren, datieren aus dem Jahre 1840. Sie wurden von J. W. Drayer in New York ausgeführt und von Whipple für das Observatorium von Harvard (1850), später wurden sie durch den Amerikaner Humphrey und durch Barkowski in Königsberg fortgesetzt. Waren die ersten Aufnahmen auch noch nicht voll befriedigend, so waren die folgenden, hauptsächlich die von Warren de la Rue in London 1852, H. Draper de Hastings seit 1860, oder die mit besonderer Vorsicht hergestellten von Rutherford in Cambridge (U. S),. von Gould in Argentinien, den Brüdern Henry in Paris, Prinz in Brüssel, von Pickering in Cambridge (U. S.), Spitaler in Wien, Wolf in Heidelberg, Weineck am Lick-Observatorium und anderen wesentlich besser. Man war jetzt in der Lage, nicht nur größere allgemeine Photographien, sondern wahre selenographische Atlanten herzustellen, wie z. B. jene von Weineck, von Krieger und König, von Loewy und Puisseaux.

In bezug auf die Entstehung der Oberflächengestaltung des Mondes wurden von verschiedenen Selenographen die verschiedensten und seltsamsten Theorien aufgestellt, welche sich jedoch im Laufe der Zeit auf einige wenige reduzierten, die, gestützt auf geologisehe Erfahrung, von namhaften Geologen angenommen und aufgeführt wurden. Es gehören hierher die Arbeiten von Toula, Sueß, Franz, Meydenbauer, Dahmer und von Sacco, der (1897) zum ersten Male eine nach geologischen Kriterien ausgearbeitete Mondkarte, begleitet von schematischen Profilen der Lithosphäre des Mondes, vor Augen führte.

2. Die wichtigsten astronomischen Daten des Mondes. Synodischer Umlauf 29 Tage 12 Std. 44 Min. 2 Sek., Sideralumlauf 27 Tage 7 Std. 43 Min. 11 Sek. Exzentrizität der Planetenbahn 0,05490807. Inklination der Planetenbahn auf der Ekliptik 5° 8′ 40″. Inklination des Aequators 1° 32′ 9″. Maximum der Libration, Länge 7° 45′, Breite 6° 44′. Maximum der geozentrischen Libration 10° 16′. Maximum der von der Erde sichtbaren Mondesoberfläche 0,59. Für die Erde unsichtbare Mondesoberfläche 0,41. Größte Entfernung von der Erde 407116 km. Kleinste Entfernung von der Erde 356660 km. Mittlere Entfernung von der Erde 384372 km. Wirklicher Durchmesser 3481 km, nämlich 0,2726 des Erddurchmessers. Relative Masse 0,01228 oder $\frac{1}{81,40}$ der Erde. Relative Oberfläche 0,07448 oder $\frac{1}{13,43}$ der Erde = ~~9,372 226 800~~ km². Relatives Volumen 0,02033 oder $\frac{1}{49,20}$ der Erde = 22106 Millionen km³. Relative Dichtigkeit 0,60419 (Erde = 1) oder 3,444 (Wasser = 1). Gravitation an der Oberfläche in Beziehung zur Erde 0,16489 oder $\frac{1}{6,065}$.

3. Die Oberfläche des Mondes. Die Mondoberfläche stellt sich dem unbewaffneten Auge als ein unregelmäßiges Gebilde von helleren (Terrae) und dunkleren (Maria) Regionen dar. Beide, besonders aber die Terrae, erscheinen dem bewaffneten Auge übersät mit den sogenannten Ringwällen und Kratern, welche zum Teil von besonders lichtstarken Strahlenkränzen umgeben sind.

Die sogenannten „Terrae“ sind ausgedehnte helleuchtende Regionen, welche man im Gegensatz zu den Maria mit Hilfe des Teleskops als unregelmäßige Hochflächen von schlackenartiger Oberflächenbeschaffenheit erkennt. Sie sind mit tausenden kleiner und großer lochartiger Ringwälle bedeckt und nicht wie die Berge der Erde in Reihen angeordnet, obwohl einige dieselben Namen (Alpen, Apenninen, Karpathen) wie die irdischen Gebirge erhalten haben. Ihre Erhebungen sind sehr unregelmäßig, sie steigen bis zu 6000 und 8000 m über die Maria empor und stellen wahrscheinlich noch Reste der ersten Verfestigungen der Mondoberfläche in schlackenartiger Form dar.

Die „Maria“ hingegen sind weniger lichtstark, von bräunlicher Farbe und stellen mehr oder weniger regelmäßige, meist weit ausgedehnte, fast ebene Depressionen dar. Sie sind weniger ausgedehnt als die Terrae, zwischen die sie in unregelmäßiger Weise eingestreut liegen, und von denen sie oft schroffe, mehrere 1000 m hohe, manchmal überhängende Abhänge trennen. Die Flächen der verschiedenen Maria zeigen auch unter sich eine verschiedene Höhenlage, ihre Umgrenzung ist meist von nahezu runder bis elliptischer Gestalt und zeigt nicht selten Ausbuchtungen, die man als „Sinus“ bezeichnet. Die Maria zeigen ganz verschiedene Dimensionen. Neben solchen von wenigen 100 km finden sich andere von über 1000 km Durchmesser. Sind sie dem Umfang nach klein, so werden sie auch „Lacus“ benannt.

von denen sich einige sogar der Gestalt der Ringe nähern. Wahrscheinlich sind die Maria jene Gebiete der Mondoberfläche, welche zuletzt erstarrten, wie dies ja auch die darauf vorhandenen erhabenen Wellen und furchenähnlichen Vertiefungen beweisen, auf die wir später noch zu sprechen kommen werden.

Die sogenannten „Paludes“ stellen mehr oder weniger regelmäßig runzlige Gebiete dar, welche durch ihre Höhenlage, Gestalt und Oberfläche und wahrscheinlich auch nach ihrer Entstehung die Mitte zwischen Terrae und Maria halten.



Fig. 2. Der nordöstliche Teil des Mare Imbrium, der schöne Sinus Iridum, und viele Ringe und Krater. Nach einer Photographie.

Die „Ringe“ (Ringgebirge, Ringwälle, Krater) sind kreisförmige bis elliptische Erhöhungen mit im Verhältnis zu den umgebenden Gebieten größerer oder geringerer Höhe. Sie zeigen im Innern im allgemeinen eine tiefe Depression, die oft weit unter das Niveau der umgebenden Regionen sinkt. Diese Depressionen sind nicht selten eben, oft aber zeigen sie fast in der Mitte unregelmäßige höckerartige Erhöhungen. Neben diesen charakteristischen und häufigen Ringwällen erscheinen auch solche von subkonischer Form, die durch eine bedeutende Höhe ausgezeichnet sind und, wie z. B. der Copernicus, an die Vulkane der Erde erinnern. Die Ringwälle sind besonders zahlreich in den Terrae, welche fast überall dadurch wie durchlöchert erscheinen. Sie sind weniger zahlreich und nicht so groß, aber im allgemeinen regelmäßiger in den Maria; immerhin aber sind sie eine sehr häufige Erscheinung, ja man kann auf der von der Erde aus sichtbaren Mondoberfläche nicht weniger als 10000 größere und kleinere wahrnehmen. Außer den einfachen und vollständigen existieren auch in großer Zahl unvollständige, wahrscheinlich durch spätere Neubildung benachbarter Ringe oder auch durch magmatische Neueruptionen halb zerstörte Ringwälle. Es wäre jedoch auch möglich, daß manche davon schon bei ihrer Entstehung durch die Unregelmäßigkeit in den Bildungsvorgängen zu unvollkommener Ausbildung gelangten. Oefter findet sich auch eine größere Anzahl von unregelmäßig konzentrischen Ringen vereinigt. Was den Durchmesser der Ringe betrifft, so ist er äußerst verschieden, bei einigen beträgt er 200 km und mehr, und von diesen hat man alle Uebergänge bis zu den kleinen abgerundeten, welche Krater genannt werden. Die kreisrunden Erhöhungen, welche die Ringe bilden, sind manchmal einfach, öfter aber gleichen sie, durch Aneinanderlagerung konzentrischer Erhebungen, aufgeblühten Rosen. Ihre Entstehung bildet noch immer den Gegenstand der Diskussion. Die zuerst

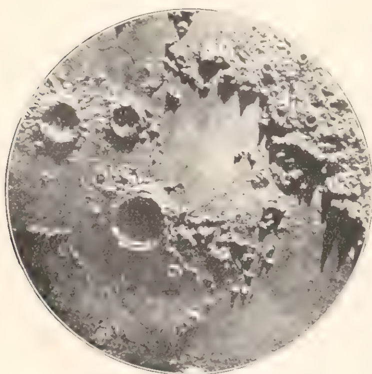


Fig. 3. Die Mondapeninnen und die Krater Archimedes, Aristillus und Autolycus. Handzeichnung.

angenommene Meinung, welche auf den ersten Blick auch sehr natürlich erscheint, war die, daß es sich einfach um erloschene Vulkane handele. Diese Auffassung wurde bald durch andere Theorien verdrängt, von denen die eine (Rozet) annahm, daß die Ringe ihre Entstehung der Tätigkeit eigentümlicher Wirbel verdanke, während die andere aussprach, sie seien Aeußerungen der im Mondinnern wirkenden Ebbe und Flut auf die Rinde des Mondes, indem an den Stellen der Ringe das glutflüssige Magma hervorgebrochen sei (Faye, H. Hebert, J. B. Hannay). Wieder andere vermuteten, daß es sich um Eruptionen und darauffolgende Zusammenbrüche zum Teil unter der Einwirkung größerer Schneemassen handele (J. Ericsson, G. E. Peal). Wieder andere endlich schreiben die Entstehung der Ringe dem Aufschlagen von Meteorsteinen zu (Gruythuisen, Meydenbauer, Gilbert, Alsdorf, Shaler, Proctor). Diese Theorien wurden durch eine andere ersetzt, welche uns natürlicher und logischer zugleich erscheint. Man könnte sie Theorie der Blasen nennen. Sie ist in etwas verschiedener Weise von verschiedenen Forschern dargestellt worden (Secchi, R. Hooke, J. Bergeron, A. St.-Claire, Humphreys und Puiseaux). Der letztere meinte, die Ringe seien Blasen gewesen, deren Inneres in sich zusammengestürzt sei. Wahrscheinlich aber sind Ringe und Krater der letzte Akt der vulkanischen Tätigkeit auf dem Monde, indem sie eine Art Schlußaufwallung der schmelzflüssigen Masse darstellen. Es sammelten sich bei der Erstarrung der feurigflüssigen Masse Gasblasen, die an die Oberfläche stiegen und dort explodierten. Die Gase entstammen Reaktionen in dem feurigflüssigen Magma selbst und hatten eine außerordentliche Expansionskraft. Vermutlich erneuerte sich das Phänomen an denselben Punkten zwar zu wiederholten Malen, aber mit verminderter Stärke und so entstanden große Ringe, in welche kleinere zu stehen kamen, welche die Regelmäßigkeit der ersteren beeinträchtigen. Die Expansivkraft der Gase war besonders groß, wegen der auf dem Monde verminderten Schwerkraft. Es ist übrigens wahrscheinlich, daß das Phänomen nicht immer zu dem gleichen Resultate führte, d. h. daß nicht immer ein neuer Ring der Erfolg war, denn da und dort sieht man in den Maria einzelne eigentümliche Kuppeln, welche den Ort einer ehemaligen Blase zu bezeichnen scheinen, die zwar das teigartige Magma etwas zu heben, aber nicht mehr zu durchbrechen vermochte. Die zuletzt gegebene Erklärung der Ringe stützt sich einerseits auf die Beobachtungen der irdischen, mit feurigflüssiger, kochender Lava erfüllten Lavaseen in den Vulkanen Hawaiis, welche ebenfalls eine Entwickelung von Blasen, von stufenartigen Erhöhungen und Brüchen auf den verfestigten Oberflächen aufweisen, die in der Form denen der Mondoberfläche ähnlich sind. Andererseits stützt sich die Erklärung auf zahlreiche Experimente (Poulett-Scrope, Bergeron, Stewart Harrison, De Beaumont, Gorini, St. Meunier, F. Sacco u. a.). Die Genannten haben verschiedene teigartige Substanzen, wie Gips, Kalk, Schwefel, Wachs, Ton erkalten und durch die erstarrende Masse Blasen aufsteigen lassen. Aehnliche Erscheinungen hat man auch in den Schmelzöfen an erstarrenden Metallschmelzflüssen beobachtet. Bei all diesen Vorgängen bilden sich erhöhte Ringe oder kleine, in der Mitte zusammensinkende Krater an den Stellen, wo Gase blasen auftreten und explodieren. Analoge Erscheinungen hat man aber auch an erstarrenden vulkanischen Laven beobachtet.

Welche Wichtigkeit den vulkanischen Gasen zukommt, haben die Forschungen von Bergeron, A. Gauthier, A. Brun, Jaquerod klar dargetan. Diese Gase sind hauptsächlich Kohlensäure, Salzsäure, schweflige Säure, Wasserstoff, Kohlenoxyd und sie entwickeln sich aus den Laven bei einer zwischen 1100° und 900° liegenden Temperatur.

Die kleineren Ringe, die man auch „Krater“ genannt hat, sind gewöhnlich sehr regelmäßig und auch gut erhalten. Sie sind oft gegenüber ihrer Umgebung beträchtlich erhöht und umgeben von einem helleuchtenden Strahlenkranz. Am häufigsten erscheinen sie in den Maria oder im Innern großer Ringe und sind vermutlich das Erzeugnis der letzten Aufwallung, d. h. der letzten Entwickelung von Gas durch das immer weiter erstarrende Magma. Die häufig im Innern der Ringe vorhandenen höckerartigen Erhöhungen sind nach allgemeinem Dafürhalten echte vulkanische Kegel, werden vielleicht aber besser als die Ueberreste der letzten Ausbrüche, als magmatische Erhebungen oder als kuppelartige Auftreibungen der letzten Blasen angesehen; wie man ja auch ähnliche Erscheinungen bei den oben angeführten Experimenten beobachtet hat. Uebrigens hat man auch auf der Erde ähnliche Lavakuppeln beobachtet, wie z. B. die Kuppelvulkane der Insel Réunion oder einige Schotterkegel von Oregon oder die sogenannten Pitons oder die Ornitos der Kanarischen Inseln oder die Anschwellungen der Laven auf Santorin.

Die in hellem Lichte glänzenden „Strahlenkränze“ sind Streifen, die von einigen Kratern der Mondoberfläche sich radial über hunderte und tausende Kilometer über alle Erhebungen und Vertiefungen, über Terrae und Maria hinweg erstrecken. Den

schönsten Strahlenkranz hat der Krater Tycho. Er verbreitet sich über einen großen Teil der Mondoberfläche. Aber auch andere Krater, wie z. B. der Copernicus, der Kepler, Lalande, Aristarch, Aristillus u. a., haben ähnliche Strahlenkränze. Nicht immer



Fig. 4. Die Gegend der Ringe Eratosthenes, Copernicus, Kepler (mit starkem Strahlenkranze) usw. Nach einer Photographie.

gehen die Strahlenkränze nach allen Seiten, sondern manchmal sind es nur einzelne Büschel, wie bei Messiers, oder einfach ein den Krater umgebender heller Schein (Aureole) wie bei Descartes, Euclides und Manilius. Die Deutung der Strahlenkränze und der Lichtzonen ist bis heute noch nicht gelungen, obwohl verschiedene Versuche in dieser Richtung gemacht wurden. **Nasmyth** hält sie für mit einer weißlichen Materie angefüllte Spalten, **Neison** erklärt sie als das Produkt meteorologischer Phänomene, **Würdemann** verknüpft sie mit kosmischen Ursachen (Meteoriten), andere halten sie für Schneedecken und wieder andere für elektrische Erscheinungen. Sehr wahrscheinlich aber handelt es sich um ein Phänomen ähnlich dem der berühmten „Nuées ardentes", das von **Lacroix** von der Montagne Pelée so vortrefflich beschrieben wurde und bei vulkanischen Eruptionen gar nicht selten ist. Es handelt sich hierbei nämlich um heftige Ausbrüche von mit Asche gemengten Gasen von hoher Spannung und Temperatur, welche durch die Spalten der Seitenwände der vulkanischen Krater ihren Ausgang nehmen. Sie finden in der Regel statt in den Augenblicken der höchsten Spannung und der darauffolgenden Paroxysmen und verlassen mit ungeheurer Geschwindigkeit den Vulkan. Auf ihrem Wege talab hinterlassen sie strahlenförmig angeordnete Streifen aus weißlicher Asche und Sublimationsprodukten aller Art. Es ist nicht unwahrscheinlich, daß die Strahlenkronen der Krater ähnlichen Vorgängen und ähnlichen Stoffen ihre Entstehung verdanken, und so würde sich auch erklären, warum die hellen Linien fast unabhängig sind von der übrigen Orographie des Gebietes, auf dem sie auftreten. Ihre gewaltige Ausdehnung kann entweder bedingt sein durch die Heftigkeit der ursprünglichen Explosion oder durch das Fehlen, bezw. durch die außerordentliche Verdünnung der Mondatmosphäre oder aber durch die geringe Schwerkraft auf dem Mond, alles Dinge, welche dazu beitragen konnten, eine weite Ausbreitung zu veranlassen. Ihre Erhaltung ist dem Mangel an Regen und Wind zuzuschreiben, denn auf der Erde werden sie außerordentlich schnell zerstört.

Interessant ist die Tatsache, daß an zahlreichen und verschiedenen Teilen der Mondoberfläche eigentümliche „**Furchen**" und „**Klüfte**" wahrgenommen werden können, die eine verschiedene Breite und Länge besitzen. Einige darunter nehmen solchen Umfang an, daß sie Täler genannt werden können, wie z. B. das Tal der Alpen, das eine Längsausdehnung von mehr als 150 und eine Breite von ungefähr 4 km besitzt, dann das Tal von Rheita (eine Einsturzzone oder Graben) mit 20 km Breite. Nicht selten sind die Furchen als echte Brüche oder Verwerfungen mit geradlinigem oder manchmal etwas gebogenem Verlauf, manchmal auch von gabelförmiger oder winkliger Gestalt zu bezeichnen. Diese „**Selenoklasen**", deren man schon über 1000 kennt, sind da und dort in subparallele Scharen zusammen gruppiert und stehen in engster Beziehung zu den stufenförmigen Erhöhungen, welche die Maria umgeben. Sie stellen demnach periphere Staffelbrüche dar, wie man es zwischen den Abhängen in dem Mare Imbrium oder auch im westlichen Teile des Mare Humorum beobachten kann. Die Sprunghöhe dieser Verwerfungen be-

trägt oft mehrere 1000 m, wie z. B. am Altaigebirge des Mondes. Es ist anzunehmen, daß diese Brüche durch Zusammenziehung und Volumenverminderung der Magmaoberfläche während der Abkühlung in ähnlicher Weise entstanden sind, wie die an den vulkanischen Massen der Erde oder wie die, welche man bei Laboratoriumsexperimenten beobachten kann. Derartige Brüche und Verwerfungen müssen auch im Mond in verschiedenen geologischen Perioden entstanden sein. Auch auf dem Mond beobachtet man einfache Spalten und solche, welche wiederholtem Absinken ihre Entstehung verdanken, die letzteren besonders an den Begrenzungselementen der Maria, welche ja große Senkungsgebiete darstellen. Sie erinnern, wie schon gesagt, an gewisse Lavaterrassen der Hawaischen Vulkane oder an die gigantischen Fault oder Fault-Cliffs in Nordamerika, an die gewaltigen Grabenversenkungen Nordafrikas, oder endlich an die gewaltigen Erdbebenspalten Chiles, Kaliforniens, Neuseelands und Japans. Sie werden bei ihrer Entstehung von heftigen „Mondbeben" begleitet gewesen sein. Wie die Ringe, so entstanden selbstverständlich auch die Spalten zu verschiedenen Zeiten und in verschiedener Weise, denn auch bei ihnen beobachten wir verschiedene Formen und verschiedene Zustände der Erhaltung. Einige sind ganz zernagt und verändert, während andere in reiner und guter Form erhalten sind.

Interessant sind weiter die „Rugen" oder „Runzeln", mehr oder weniger ausgebreitete wellenförmige, manchmal gegabelte, öfter geschaarte flache Erhebungen, die man in den meisten Maria beobachten kann. Sie müssen entstanden sein, ehe die Mondoberfläche in den Maria vollständig erstarrt war. Da und dort sind sie von Längsrissen begleitet, die besonders an den Stellen der größten Ausdehnung auftreten und sie erinnern etwas an die orogenetischen Runzeln der Erdoberfläche. Man kann ähnliche Erscheinungen künstlich hervorrufen, wenn man teigartige Massen einer leichten seitlichen Neigung aussetzt.

Eine eigentliche Atmosphäre scheint der Mond wenigstens zurzeit nicht zu besitzen und vermutlich auch keine größere Menge von Wasser an seiner Oberfläche. Es gibt jedoch Gelehrte, welche die Meinung haben, daß der Mond von einer dünnen, mehr oder weniger ausgedehnten Schicht oder Kruste von Eis bedeckt sei. Jedenfalls aber stellt der Mangel oder Quasimangel an Atmosphäre und Wasser ein sehr wichtiges Faktum dar, weil sich daraus ergibt, daß sich weder eine Lebewelt ähnlich der unserigen, noch eine ebenso starke Veränderung der Mondoberfläche entwickeln konnte, wie bei unserer Erde. Hierbei wirkt auch noch mit, daß die Temperatur auf dem Monde äußerst niedrig ist, einzig und allein der starke Temperaturwechsel zwischen Tag und Nacht auf dem Monde vermag geologisch eine gewisse Rolle zu spielen.



Fig. 5. Bucht des Mare Tranquillitatis und des Mare Serenitatis, mit Brüchen, Furchen, Kratern (Arago, Plinius) und Ringen (Manlius, mit Strahlenkranz). Nach einer Photographie.

Die Frage nach der chemischen und mineralogischen Beschaffenheit des Mondes ist nur ungefähr und mit großer Vorsicht zu beantworten. Aus der Gestalt und der Farbe, aus der mittleren Dichte des Mondes (3,4) kann man mit einiger Wahrscheinlichkeit folgendes schließen: 1. daß die Metalle im Innern des Mondes nicht so reichlich vorhanden sein werden, wie wir es für das Innere der Erde vermuten; 2. daß der Mond zum größeren Teile aus steinigem Material bestehen muß, ähnlich demjenigen unserer basischen Eruptivgesteine, welches auch den Hauptbestandteil der Meteorsteine ausmacht. Vielleicht sind die schlackenartigen, mehr weißen Gebiete der Terrae überwiegend

saurer, liparitischer oder trachytischer Natur, während die bräunlichen ebeneren und glatteren Teile der Maria eher basischen oder basaltischen Charakter haben, ähnlich den analogen Gesteinen der Hawaischen Inseln.

4. Evolution des Mondes. Die Entstehung des Mondes ist wahrscheinlich mit derjenigen der Erde mehr oder weniger verknüpft, denn es scheint kaum annehmbar, daß es sich hierbei um ein Rupturphänomen handelt, wie bei einigen Satelliten anderer Planeten. Es läßt sich jedoch nicht mit Bestimmtheit sagen, ob die gemeinschaftliche Entstehung auf jene ferne kosmische Periode zurückzuführen ist, in welcher sich diese Himmelskörper noch in einem gasförmigen Zustande befanden oder ob die Trennung erst in der Folge im flüssigen Zustande stattgefunden hat. Einige Naturforscher vermuten, daß die gewaltige Depression des Stillen Ozeans der Erde die Narbe darstelle, aus der der Mond sozusagen herausgeschnitten sei. Diese Vermutung erscheint jedoch nicht begründet und es ist viel wahrscheinlicher, daß sich die Trennung der Massen schon viel früher vollzogen hat. Ob nun der Mond sich aus der Erde gebildet hat oder ob beide Planeten syngenetisch sind, d. h. im Verhältnis von älteren und jüngeren Geschwistern zueinander stehen oder ob zwischen ihnen noch andere Beziehungen vorhanden sind, so können wir doch das eine sagen, daß sie durch das Gesetz der Gravitation eng miteinander verbunden ein einheitliches Ganzes bilden. Die Folge davon war, daß bei der geringen Entfernung des Mondes von der Erde seine Rotationsdauer sich allmählich verminderte, bis sie gleich der Umlaufszeit um die Erde war. So kommt es, daß der Mond der Erde immer die gleiche Seite zeigt (vgl. den Artikel „Gezeiten").

Bei der Entwickelung des Mondes kann man 5 Phasen oder selenologische Epochen unterscheiden: eine archäische, eine primäre, eine sekundäre, eine tertiäre und eine quartäre Epoche, die aber keineswegs mit den gleichnamigen irdischen Perioden übereinstimmen. Als archäische Epoche könnte man diejenige annehmen, in der der Mond sich noch in glutflüssigem Zustande befand. Sie mußte zwar lang sein, aber doch kürzer als diejenige der Erde, weil das Mondvolumen nur $1/41$ und seine Masse $\frac{1}{81.4}$ von dem der Erde beträgt und weil die Erde jederzeit eine gegen Ausstrahlung schützende Atmosphäre besaß.

Die primäre Epoche kann man mit dem Uebergang vom flüssigen in den festen Zustand bei einer Temperatur von ungefähr 1000° beginnen lassen. Es entstand dann eine schlackige Rinde, die allmählich immer dicker und dicker wurde. Die Oberfläche war rauh, unregelmäßig und wellenförmig gegliedert. Es bildeten sich die sogenannten Terrae von wahrscheinlich trachytischer Natur, deren spezifisches Gewicht 2 bis $2^1/_2$ ist. Diese Schlackenbildungen bedeckten nicht die ganze Mondoberfläche, sonder es verblieben weitausgedehnte flüssigen Magmaseen, aus denen sich in der Folge die Maria bildeten. Auf den Terrae entstanden Tausende und Abertausende von Ringen, in welchen das flüssige Magma die schlackige Decke durchbrach. Nebenbei zeigen sich in dieser Zeit an der Oberfläche Einstürze und gigantische Spalten, es entstanden Furchen und Brüche, die wir früher beschrieben haben.

Die darauffolgende sekundäre Epoche war von geringer Bedeutung und ist eigentlich nur als eine Uebergangszeit zur tertiären Epoche anzusehen. Die festgewordenen Terrae begannen nach den Seiten der Maria hin zu wachsen. Es bildeten sich die sogenannten Paludes und einige kleinere Maria, welche durch ihre Höhenlage, ihre Natur und ihr Aussehen eine Uebergangsstufe zwischen Terrae und Maria darstellen. Auch die Paludes wurden von Ringbildungen durchbrochen, auch sie zeigten Furchen und Brüche, während diese Tätigkeit auf den Terrae sich allmählich verminderte. Allerorts war wohl die Entstehung der Ringe und Brüche in den Terrae von großartigen Mondbeben begleitet.

In der tertiären Epoche begegnen wir äußerst wichtigen Phasen der Mondentwickelung. Es setzte sich die langsame Kontraktion der Masse fort, die ausgedehnten Gebiete der feurigflüssigen Maria kühlten sich ab und begannen langsam zuerstarren, zähflüssig und fest zu werden. Der gleiche Vorgang vollzog sich während dieser Zeit in den ringförmigen Einsenkungen der Terrae, wo die Ringbildung mehr und mehr nachließ, um schließlich, sei es infolge verminderter Gasproduktion, sei es infolge fortschreitender Erstarrung, ganz aufzuhören. Gerade in dieser letzten Zeit der Tätigkeit der Ringe müssen sich die unregelmäßigen zentralen oder subzentralen Erhöhungen einer sehr großen Zahl von Ringen und Kratern gebildet haben, die wir heute als gigantische Höcker von verschiedenartiger Gestalt erkennen. Auch in den Maria bildeten sich nun zahlreiche Ringe und Krater und daneben riesige Blasen, welche nicht mehr zu platzen vermochten und daher eigentümliche Anschwellungen und rundlichen Kuppeln erzeugten. Infolge des tangentialen Druckes auf das einsinkende Magma der Maria bildeten sich schnur- und wellenförmige Runzeln, die gleichsam die letzte Bewegung der flüssigen Masse darstellen, ehe der Inhalt der Maria vollständig erkaltete. Die tertiäre Phase des selenologischen Plutonismus ist auch dadurch charakterisiert, daß sich die ringbildende

Tätigkeit in eine pseudovulkanische verwandelte, indem sich die randliche Umgebung des Ringes durch ausgestoßenes magmatisches Material bedeutend erhöhte wie beim Copernicus und wie beim Kepler, welche dadurch eine subkonische Form annahmen und in ihrem Aussehen von dem einfachen Ring abweichen. Außerdem begann in der Tertiärepoche das explosionsartige Aushauchen und Ausstoßen von Gasen und anderen Produkten, welche zur Entstehung der leuchtenden Strahlenkränze und Aureolen Veranlassung wurden. Endlich entstanden in dieser Epoche zahlreiche neue Risse und Brüche, deren einige sogar zur Neubildung von Kratern führten, wie z. B. des Hyginus, während andere mit ihrer subparallelen oder konzentrischen Anordnung zu riesigen stufenartigen Abstürzen wurden, die die Flächen der Maria scharf von den Terrae abgrenzten. Eine Folge dieser Erscheinung ist die öfters unregelmäßige polygonale Form der Maria, wie sie das „Mare Crisium" deutlich zeigt. Auch diese Selenoklasen waren von stärkeren oder schwächeren, sicher aber bisweilen großartigen Mondbeben begleitet, zumal, wenn man die Abstürze in Betracht zieht, welche z. B. am Altai vorhanden sind.

In der Quartärepoche endlich begann die vulkanische Tätigkeit auf dem Monde allmählich ganz zu erlöschen und alle Teile des Mondes gingen in festen Zustand über. Es mögen zu Beginn dieser Zeit in den Maria noch einige Runzeln und einige Blasen entstanden sein, aber einheitliche Bewegungen fanden nicht mehr statt, höchstens kann man diese Zeit als die Zeit des Todeskampfes des Plutonismus auf der Mondoberfläche bezeichnen und ihr gehört wohl auch noch die Entstehung der Strahlenkränze an, die, wie wir früher gesehen haben, ihre Ursache vermutlich in der über Tausende von Kilometern verbreiteten Ablagerung von Asche und Sublimationsprodukten haben, welche wegen mangelnden Regens und mangelnder Atmosphäre bis auf den heutigen Tag erhalten blieben und noch bis in die fernsten Zeiten erhalten bleiben werden, während sie auf der Erde gar schnell der Zerstörung anheimfallen. Fanden diese Explosionen nicht ruckweise statt, sondern in einer langsamen fumarolenartigen Tätigkeit, so entstanden nicht die Strahlen, sondern die blaßgelben Aureolen, welche einige Mondkrater umgeben. Auch die Zusammenziehung der erkalteten Massen mag noch zur Bildung von offenen Sprüngen Veranlassung geworden sein, wie wir dies ja auch bei Laboratoriumsexperimenten beobachten können. Die zuletzt entstandenen Brüche sind gekennzeichnet durch die Frische und Schärfe ihrer Ränder und durch die relative Regelmäßigkeit ihres Verlaufs.

Wenn man auch den selenologischen Vulkanismus als seit langer Zeit erloschen ansehen kann, so ist es doch nicht ganz unwahrscheinlich, daß an manchen Stellen auch heute noch fumarolenartige Gasemanationen auf dem Monde vorhanden sind, wie es nach einigen kleinen Veränderungen zu sein scheint, welche von manchen Astronomen beobachtet worden sind. So könnte man als wahrscheinlich annehmen, daß im Innern des Mondes auch heute noch Reste halbflüssigen Magmas bestehen, denen aber die Kraft fehlt, die dicke starre Kruste zu durchbrechen. Damit hätte also die Entwickelung des Mondes ihren Abschluß gefunden. Das wenige etwa vorhanden gewesene oder durch den Vulkanismus erst gelieferte Wasser, die geringe Menge von atmosphärische Gasen wurden im Laufe der Zeit entweder von den Gesteinen absorbiert oder ging infolge der herrschenden Kälte in einen festen Zustand über, so daß wir es auf dem Mond eigentlich nur mit festen Körpern zu tun hätten. Daraus ergibt sich klar, daß das auf der Erde so wichtige

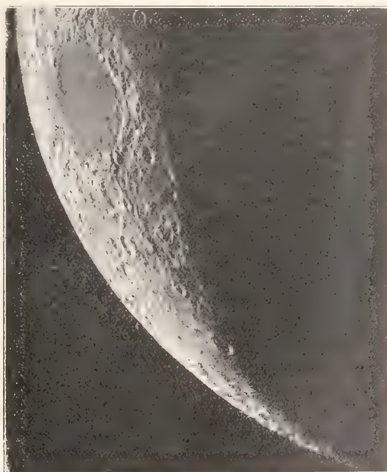


Fig. 6. Erster Oktant (eine Hälfte).

Phänomen der Verwitterung und Abtragung, der Bildung von Sedimenten an der Mondoberfläche nicht seinesgleichen hat. Es ergibt sich auch klar daraus, daß eine Entwickelung organischen Lebens auf dem Monde nicht stattfinden konnte, auch nicht, wenn etwa organische Keime von außen her dem Monde zugeführt worden wären.

Im Vergleiche zu unserer Erde hat demnach der Mond eine unvollkommene kosmische Entwickelungsgeschichte hinter sich, und er ist auf einer früheren, wir können sagen, tieferen Stufe stehen geblieben. Er ist ein toter Planet, der sich untätig um die Erde bewegt, eine Art geologischer Mumie, die uns mit ihrem Schein die Nacht erleuchtet, die durch ihre Masse die Wasser der Ozeane zu Ebbe und Flut bewegt und für den Menschen durch seine regelmäßigen Phasen den Grund zu einer Zeiteinteilung legte.

Literatur. ***W. Beer und J. H. Mädler,*** *Mappa selenographica. Berolini 1834.* — ***Dieselben,*** *Der Mond. Berlin 1837.* — ***G. Dahmer,*** *Die Gebilde der Mondoberfläche. N. Jahrb. f. Min., 1911.* — ***Ph. Fauth,*** *The Moon in Modern Astronomy. London 1910.* — ***J. Franz,*** *Ueber die Figur des Mondes, 1900* — ***Derselbe,*** *Der Mond. Leipzig 1906.* — ***Derselbe,*** *Die Verteilung der Meere auf der Mondoberfläche. Sitz. K. Preuß. Akad. d. Wissensch., 1906.* — ***W. Goodacre,*** *Map of the Moon. London 1911.* — ***S. Günther,*** *Vergleichende Mond- und Erdkunde. Die Wissenschaft, Heft* **37**, *1911.* — ***Elger Th. Gwyn,*** *The Moon. London 1895.* — ***Joh. Nep. Krieger und Rud. Konig,*** *Mond-Atlas. Triest-Wien 1898 und 1912.* — ***Ch. Lamey,*** *De la nature et de la formation des bandes ragonnantes de la Lune. Dijon 1874.* — ***J. J. Landerer,*** *La evolución del globo lunar. Barcelona 1910.* — ***S. P. Langley,*** *Solar and Lunar spectrum. Nat. Ac. of Sciences, 1886.* — ***Derselbe,*** *The Temperature of the Moon. Nat. Ac. of Sciences, 1887.* — ***M. Loewy und P. Puiseaux,*** *„Atlas photographique de la Lune (1896 bis 1910).* — ***Derselbe,*** *„Étude des photographies lunaires“.* — ***Derselbe,*** *„Sur la structure et l'histoire de l'Écorce lunaire“, in C. R. Ac. Sc. Paris.* — ***W. G. Lohrmann,*** *Topographie der sichtbaren Mondoberfläche (1824) und „Mondkarte“. Leipzig 1878 und 1892.* — ***Mainka,*** *Untersuchung über die Verlängerung des Mondes nach der Erde zu. 1901.* — ***A. Meydenbauer,*** *Die Gebilde der Mondoberfläche. Sirius 1882.* — ***Nasmyth und Carpenter,*** *TheMoon as Planet, World and Satellit, 1884.* — ***Derselbe,*** *Der Mond. Deutsch von H. J. Klein, 1906.* — ***Neison,*** *The Moon and the condition and configuration of its surface“.* ***Derselbe,*** *„Atlas von 24 Tafeln“, 1876.* — ***W. H. Pickering,*** *The Moon, 1904. S. Annals of the Astronomical Observatory of Harvard College, Vol.* **32**. — ***W. Porthouse,*** *The Moon as seen in an inverting Telescope. Manchester 1908.* — ***W. Prinz,*** *Les mesures topographiques lunaires, 1895.* — ***Derselbe,*** *Esquisse sélénologique. Bruxelles 1897, 1900.* — ***A. R. Proctor,*** *The Moon: Her motions, aspect, scenery and physical condition. London 1873.* — ***P. Puiseaux,*** *La Terre et la Lune. Forme extérieure et structure interne. Paris 1908.* — ***F. Sacco,*** *Essai schématique de Sélénologie. Turin 1907.* — ***Derselbe,*** *L'Évolution sélénologique. Ciel et Terre. Bruxelles 1909.* — ***S. A. Saunder,*** *The Determination of Selenographic positions and the Measurement of Lunar Photographs. Mem. R. Ac. Sc., 1904 bis 1910.* — ***R. Schlinder,*** *La Mécanique de la Lune, 1905.* — ***J. Schmidt,*** *Karte der Gebirge des Mondes. Berlin 1878.* — ***Shaler,*** *A comparison of the Features of the Earth and the Moon.* — ***Warren de la Rue,*** *The Moon. 12 Photographien. London 1863.* — ***Weinek,*** *Photographischer Mond-Atlas, 1894 bis 1897. Publications of the Lick Observatory,* **3**, *1894.*

F. Sacco.

Semper

Karl.

Geboren am 6. Juli 1832 zu Altona, gestorben am 20. Mai 1893 in Würzburg. Besuchte 1848 die Seekadettenschule in Kiel und darauf, als diese einging, die polytechnische Schule in Hannover. 1854 gab er seine technischen Studien auf, um Zoologie in Würzburg zu studieren. Schon als Student war er wissenschaftlich rege tätig. Nach seiner Promotion unternahm er 1858 bis 1865 eine große Studienreise nach Manila, den Philippinen und den Palau-Inseln. Nach seiner Rückkehr habilitierte er sich in Würzburg und erhielt 1869 die Professur für Zoologie und vergleichende Anatomie. 1889 übernahm er auch das Direktorium des neugegründeten zoologisch-anatomischen Instituts. Er beschäftigte sich in den ersten Jahren seines Würzburger Aufenthalts mit der Bearbeitung der reichen Ausbeute seiner Reise: so schrieb er: „Reisen im Archipel der Philippinen“ (1867), „Die Philippinen und ihre Bewohner“ (Würzburg 1869), „Die Palau-Inseln im stillen Ozean“ (Leipzig 1870). Im Verein mit anderen Gelehrten: „Reisen im Archipel der Philippinen“, 2. Teil: Wissenschaftliche Resultate (Bd. **1**, Leipzig 1868, Bd. **2** bis **10** Wiesbaden 1870 bis 1906).

Außerdem schrieb er: „Entwickelungsgeschichte der Ampullaria polita nebst Mitteilungen über die Entwickelungsgeschichte einiger anderer Gastropoden aus den Tropen“ (Utrecht 1862), „Die Verwandtschaftsbeziehungen der gegliederten Tiere“ (Würzburg 1875), „Die natürlichen Existenzbedingungen der Tiere“ (Leipzig 1880), 2. Teile. „Die Niere der Pulmonaten“ (Wiesbaden 1894). Ferner gab er heraus: „Arbeiten aus dem zoologisch-zootomischen Institut in Würzburg (Bd. **1** bis **5**, Würzburg 1871 bis 1882; Bd. **6** bis **10**, Wiesbaden 1882 bis 1895).

Literatur. ***Schuberg,*** *Karl Semper. Würzburg 1893 und Wiesbaden 1895.*

W. Harms.

Senarmont

Henri Hureau de.

Geboren am 6. September 1808 zu Broué im Département Eure et Loire; gestorben zu Paris am 30. Juni 1862. Er wurde in Paris erzogen und besuchte später dort die polytechnische Schule, die er 1829 als Bergeleve verließ. Als Ingenieur war er dann mit der Leitung der Minen in Rive de Gier, später in Creusot beauftragt. Nach seiner Ernennung zum Chefingenieur (1848) erhielt er die Professur für Mineralogie an der Ecole des mines. 1852 wurde er Mitglied der Akademie der Wissenschaften.

Außer seinen geologischen Beschreibungen der Départements Seine-et-Marne und Seine-et-Oise (1844) beschäftigten sich seine Arbeiten vornehmlich mit mineralogischen Fragen. Besonders bekannt geworden sind seine Untersuchungen über die Doppelbrechung („Recherches sur la double réfraction“ und „Sur la théorie mathematique de la double réfraction“), ferner über elektrisches und Wärmeleitungsvermögen der Mineralien, über optische Eigenschaften isomorpher Körper und über die künstliche Darstellung von Mineralien. Außerdem verdient seine Uebersetzung (1842) von W, H. Millers: „A treatise on crystallography“ Erwähnung.

Literatur. ***Bertrand**, Éloge de Senarmont, lu à la Société des amis des sciences, 16. avril 1863.*

K. Spangenberg.

Senebier

Jean.

Geboren am 6. Mai 1742 in Genf. Er wurde nach dem Studium der Theologie 1765 Pastor in seiner Vaterstadt. 1769 ging er als Oberbibliothekar nach Chancy und kehrte 1773 in derselben Eigenschaft nach Genf zurück. Er starb dort am 22. Juli 1809. Er bemühte sich bei seinen pflanzenphysiologischen Arbeiten die Ergebnisse der Chemie und Physik anzuwenden, und es glückte ihm, wichtige Tatsachen über die Photosynthese und den Gasstoffwechsel der Pflanzen aufzudecken. Erwähnt seien vor allem die „Mémoires sur l'influence de la lumière solaire pour modifier les êtres des trois règnes de la nature“ (Genf 1782, 3 Bde.), der „Rapport de l'air atmosphérique avec les êtres organisés“ (ebendort 1807, 3 Bde.) und die weniger wichtige „Physiologie végétale (ebendort 1782 bis 1888, 5 Bde.). Er hat auch meteorologische, bibliographische u. a. Schriften veröffentlicht. Besonders vorbildlich wirkte er in seinem „Essai sur l'art d'observer et de faire des expériences“ (3. Aufl. Genf 1802, 3 Bde.).

Literatur. ***Maunoir**, Éloge historique. Genève 1810. — **Sachs**, Geschichte der Botanik, S. 535.*

W. Ruhland.

Septarien.

Zu den Lößpuppen (siehe dort) gehörige Konkretionen, die im Innern von radialen Sprüngen durchsetzt sind.

Serveto

Miguel.

1511 bis 1553 der aus der Kirchengeschichte als Häretiker bekannte ehemalige Theolog, später zur Medizin übergegangene heftige Bekämpfer des Arabismus und Entdecker des kleinen (Lungen-) Kreislaufes. Er stammte aus Villanueva in Arragonien, anfangs studierte er die Rechte, dann Theologie in Toulouse, veröffentlichte mehrere Arbeiten im antitrinitarischen Sinne, hielt sich an verschiedenen Orten auf und nahm aus Not 1543 eine Stellung als Korrektor einer Druckerei in Lyon an, nachdem er von den Verwandten verstoßen worden und sogar einen anderen Namen (Villanovanus) anzunehmen genötigt war. Vom Leibarzt des Herzogs von Lothringen, Symphorien Champier, den er in Lyon kennen lernte, protegiert, ging er auf dessen Veranlassung zum Studium der Medizin in Paris über, trat hier schriftstellerisch mit seinen, den Arabismus bekämpfenden Ansichten hervor, praktizierte unter wechselnden Schicksalen an verschiedenen Orten und mußte schließlich, als der berüchtigte Ketzer erkannt, fliehen, begab sich nach Genf zu Calvin, in der Hoffnung bei diesem Schutz zu finden, wurde aber gerade von diesem denunziert und mußte den Feuertod erleiden. Seine bekannte Entdeckung findet sich in „Christianismi restitutio“ (Lyon 1543), einer jetzt außerordentlich seltenen Schrift, in der mit ziemlich klaren Worten der kleine Kreislauf beschrieben wird. „Item a pulmonibus ad cor non simplex aër sed mixtus sanguine mittitur ad arteriam venosam. Ergo in pulmonibus fit mixtio“. Diese Entdeckung ist übrigens fast die einzige, für die Physiologie bemerkenswerte Leistung im 16. Jahrhundert.

Literatur. *Biogr. Lex. ed. Hirsch.*

J. Pagel.

v. Siebold

Karl Theodor Ernst.

Geboren am 16. Februar 1804 in Würzburg, gestorben am 7. April 1885 in München. Studierte in Berlin und Göttingen von 1823 bis 1828 Medizin und wurde 1831 Kreisphysikus in Heilsberg. 1834 wurde er Direktor der Hebammenschule in Danzig, um, wie er später scherzweise sagte, bequem seinen zoologischen Studien an der Ostsee nachgehen zu können. Mehrere wichtige zoologische Abhandlungen, so über die Entwickelungsgeschichte der Ohrenqualle und der Saugwürmer, zeugen für seine rege Tätigkeit. 1840 wurde er als Ordinarius nach Erlangen, 1845 nach Freiburg, 1850 nach Breslau als Nachfolger des Physiologen Purkinje und endlich 1853 nach München berufen. Hier war er zunächst zugleich Physiolog und Anatom, vertrat dann aber nur die vergleichende Anatomie. Das Wesen seiner Forschung hat R. Hertwig treffend bezeichnet als „geistvolle Naturbetrachtung, wobei er sich aber nicht mit der klaren Auffassung und Darstellung der Tatsachen begnügt, sondern sich auch bemüht habe, die Einzelbefunde zu den Grenzen der Wissenschaft in Beziehung zu setzen

und durch vorurteilsfreie Beurteilung derselben wichtige allgemeine Tatsachen zu erzielen".

In den Ruhm, die Geheimnisse des Bienenstaates aufgeklärt zu haben, teilt sich Siebold mit Leuckart und Dzierzon, indem er die von Dzierzon aufgestellten Theorien durch Tatsachen bestätigte. Auch ist er als der wissenschaftliche Entdecker der Parthenogenesis bei den Insekten anzusehen. Siebold hat noch, schon an der Schwelle des Greisenalters stehend, die durch die Schriften Darwins hervorgerufene Umwälzung mitgemacht und sich ganz in den neuen Ideenkreis eingelebt. Er hat sich mit aller Bestimmtheit für die Deszendenztheorie erklärt.

Seine wichtigsten Werke sind: „Lehrbuch der vergleichenden Anatomie der wirbellosen Tiere" (Berlin 1848), eine wichtige und ebenbürtige Ergänzung der Stanniusschen vergleichenden Anatomie der Wirbeltiere, „Ueber die Blasen- und Bandwürmer" (Leipzig 1854), „Wahre Parthenogenesis bei Schmetterlingen und Bienen" (daselbst 1856), „Beiträge zur Parthenogenesis der Arthropoden" (daselbst 1861) „Die Süßwasserfische von Mitteleuropa" (daselbst 1863). Mit Kölliker gründete er 1849 die „Zeitschrift für wissenschaftliche Zoologie", die heute von Ehlers herausgegeben wird.

Literatur. *Chronik der Ludwig Maximilians-Universität. München 1884/85.* — **R. Hertwig.** *Denkrede auf K. Th. E. v. Siebold in der Münchener Akademie der Wissenschaften, 23. März 1886.* — **Carus,** *Geschichte der Zoologie. München 1872.* — **Burckhardt,** *Geschichte der Zoologie. Leipzig 1907.*

W. Harms.

v. Siemens

Ernst Werner.

Geboren am 13. Dezember 1816 in Lenthe bei Hannover, gestorben am 6. Dezember 1896 in Berlin. Er war der Sohn eines Gutspächters. Im 9. Jahre siedelte er mit seinen Eltern nach Menzendorf bei Ratzeburg über, wo er im elterlichen Hause den ersten Unterricht genoß, bis er in die Obertertia des Lübecker Gymnasiums, die Katharinenschule, eintrat, das er 1834 mit Primareife verließ, um preußischer Artillerieoffizier zu werden. 1835 wurde er zur Artillerie- und Ingenieurschule in Berlin kommandiert und fand hier Gelegenheit, seine Kenntnisse in Mathematik, Physik und Chemie zu erweitern. Zur Truppe zurückgekehrt, widmete Siemens seine freie Zeit wissenschaftlich-technischen Studien, die bald von Erfolg gekrönt waren. 1841 entdeckte Siemens ein Verfahren zur galvanischen Versilberung und Vergoldung, das er sich alsbald patentieren ließ, und zu dessen praktischer Verwertung er mit Henniger in Berlin eine Fabrik gründete. Eine lebhafte Korrespondenz mit seinem Bruder Wilhelm, der in einer Magdeburger Maschinenfabrik angestellt war, gab Veranlassung zur Konstruktion eines Differentialregulators für Dampfmaschinen. 1844 wurde Siemens zur Artilleriewerkstätte in Berlin kommandiert, um Versuche über die Verwendbarkeit der Schießbaumwolle zu machen. Ein Kommando zu der Kommission für Einführung der elektrischen Telegraphen 1847 gab seinen Studien die Richtung auf die Elektrotechnik; er konstruierte eine Maschine zur Umpressung von Kupferdrähten mit Guttapercha. Um diese Zeit faßte Siemens den Entschluß, sich ganz der Entwickelung der Telegraphie zu widmen und gründete mit dem Mechaniker J. G. Halske im Herbst 1847 eine Telegraphenbauanstalt, die in der Folge weltberühmt gewordene Firma Siemens & Halske. Die Absicht, den Militärdienst zu quittieren, wurde durch den Ausbruch der politischen Unruhen vorerst vereitelt. Siemens legte im Kieler Hafen die ersten unterirdischen Minen mit elektrischer Zündung und baute Batterien zum Schutze des Eckernförder Hafens. In den Jahren 1848 und 1849 baute Siemens mehrere unterirdische Telegraphenleitungen, schied nach Vollendung derselben aus der Armee und aus dem Staatsdienst und widmete sich ferner ganz der Firma, aus der in rascher Folge wichtige Entdeckungen und Erfindungen hervorgingen, wie 1856 der Zylinder- (Doppel- T-) Induktor, 1857 die elektrische Ozonisierung des Sauerstoffes, 1867 die dynamo-elektrische Maschine, 1874 das Universalgalvanometer, 1876 das Selenphotometer. Die Firma legte eine große Anzahl Telegraphenleitungen in Norddeutschland sowie das russische Telegraphennetz, sie legte das erste Tiefseekabel Bona-Cagliari. 1879 baute sie für die Berliner Gewerbeausstellung die erste elektrische Eisenbahn mit stabiler Kraftquelle. Zweiggeschäfte in London, Petersburg, Tiflis, Wien wurden gegründet und zumeist von den Brüdern geleitet, ein großes Kupferbergwerk im Kaukasus wurde angekauft. 1868 trat Halske aus dem Berliner Geschäft aus, die Brüder Werner, Wilhelm und Karl übernahmen gemeinsam das Gesamtgeschäft, nach Werners Tode traten seine Söhne Arnold und Wilhelm ein. Die Universität Berlin machte Siemens 1879 zum Dr. phil. h. c., die Berliner Akademie ernannte ihn 1874 zu ihrem Mitglied, Kaiser Friedrich erhob ihn bei seiner Thronbesteigung in den Adelsstand. Eine Anzahl wissenschaftlicher Abhandlungen hat Siemens in den Berichten der Berliner Akademie veröffentlicht. Nach seinem eigenen Bekenntnis hat seine Liebe immer der Naturwissenschaft gehört, während die Notwendigkeit ihn immer wieder nach der Seite der Technik drängte.

Literatur. *Nekrolog von* **Kundt,** *Sitzungsberichte der Berliner Akademie, 1903.* — **Werner v. Siemens,** *Lebenserinnerungen, Berlin 1895.*

E. Drude.

Silikate.

1. Allgemeines. 2. Einteilung. 3. Entstehung und Synthese. 4. Konstitution.

1. Allgemeines. Das Silicium steht im periodischen System der Elemente dem

Kohlenstoff nahe. Während jedoch die Wasserstoffverbindungen des Kohlenstoffs mannigfaltig und beständig sind, sind die des Siliciums unbeständig; dagegen kommen die Sauerstoffverbindungen des Siliciums, die Silikate, in großen Mengen und sehr verschiedenen Arten, meist komplexen Verbindungen vor, während man beim Kohlenstoff nur neutrale oder basische, meist einfach zusammengesetzte Karbonate in der Natur kennt.

Die einfachen Silikate können als Salze einer oder mehrerer Kieselsäuren aufgefaßt werden. Es wird gewöhnlich eine Ortho- und Metaform angenommen, entsprechend den Formeln H_4SiO_4 und H_2SiO_3, ohne daß deren Existenz eindeutig erwiesen wäre. Die Kieselsäure ist eine sehr schwache Säure, die im reinen Zustand nicht mit Lackmus reagiert und nur wenig dissoziiert ist.

Die Annahme basischer Salze scheint wahrscheinlich, wenn sie auch nicht durch sichere analytische Reaktionen gestützt werden kann. Salze von der Bruttozusammensetzung R_4SiO_4 können nach Belieben als neutrale Salze der Orthokieselsäure H_4SiO_4 oder als basische Salze der Metakieselsäure $R_2SiO_3 . R_2O$ aufgefaßt werden. Da die meisten Silikate, mit Ausnahme der Alkalisilikate, in Wasser wenig löslich sind, so können physikalisch-chemische Untersuchungsmethoden nur selten angewandt werden. Aber auch rein chemisch wird die Frage nach der möglichen Konstitution der Silikate dadurch recht erschwert, daß man über die Rolle, welche amphoter wirkende Oxyde z. B. Al_2O_3 im konkreten Fall spielen, nichts Sicheres weiß. Das gilt besonders bei den sehr verbreiteten komplexen Aluminiumdoppelsilikaten.

In einzelnen Fällen ist es möglich, komplexe Silikate in einfache Komponenten zu zerlegen, da eine große Anzahl von ihnen feste Lösungen sind. Die Mischfähigkeit ist nicht nur auf analog konstituierte Silikate beschränkt, sondern muß auch auf einfache Oxyde wie Al_2O_3, SiO_2, CaO, MgO usw. ausgedehnt werden. Freilich läßt sich nicht immer mit Sicherheit bestimmen, ob einfach feste Lösungen vorliegen oder ob in manchen Fällen Additionsprodukte aus Silikat und Oxyd entstehen.

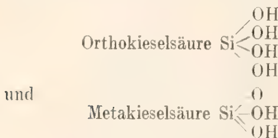
2. Einteilung. Die älteren Ansichten über die Natur der Silikate und ihre Klassifikation waren auf das sogenannte Sauerstoffverhältnis gegründet, nach welchem man den Sauerstoffgehalt sämtlicher basischer Oxyde in Beziehung zum SiO_2-Molekül brachte. So unterschied man Singulosilikate entsprechend den Salzen der Orthokieselsäure, z. B. $Zn_2SiO_4 = 2ZnO + SiO_2$, Sauerstoffverhältnis 1:1. Bisilikate entsprachen den Metasilikaten z. B. $MgSiO_3 = MgO + SiO_2$, Sauerstoffverhältnis 1:2. Die Feldspäte wurden zu den Trisilikaten gerechnet. Kalifeldspat von der Formel $KAlSi_3O_8 = K_2O + Al_2O_3 + 6SiO_2$ zeigt das Sauerstoffverhältnis $4:12 = 1:3$. Dieses Klassifikationsprinzip erwies sich als nicht ausreichend, sobald das Silikat Bestandteile enthielt, über deren Charakter, ob basisch oder sauer, man sich nicht ganz klar war. Auch die Rolle des Wassers, der Flußsäure HF, der Borsäure B_2O_3 konnte nicht erklärt werden.

Häufig werden die natürlichen Silikate in wasserfreie und wasserhaltige eingeteilt. Obwohl auch diese Einteilung nicht streng durchzuführen ist, da bei vielen Mineralien die Bedeutung des bei der Analyse gefundenen Wassers sich nicht sicher feststellen läßt, sei hier doch das von G. Tschermak vorgeschlagene Klassifikationsprinzip wiedergegeben. Danach können die natürlichen Silikate eingeteilt werden, erstens in Anhydrosilikate mit den 8 Untergruppen des Olivins, des Pyroxens-Amphibols, des Leucits, Wernerits, Feldspats, Andalusits, Granats und Epidots; zweitens in Hydrosilikate mit den 6 Untergruppen der Zeolithe, des Galmeis, Nontronits, Serpentins, Chlorits, der Glimmer und der Tone.

Die Silikate der ersten Abteilung können gesteinsbildend auftreten und sind als solche in dem Artikel „Mineralien, gesteinsbildende Mineralien" näher behandelt.

Die Silikate der zweiten Abteilung sind häufig aus denen der ersten hervorgegangen. Besonders bemerkenswert sind die Zeolithe, die beim Erhitzen unter Aufschäumen schmelzen und durch Säuren (zum Teil unter Bildung von gallertiger Kieselsäure) zersetzt werden. Sie besitzen meist geringe Härte und schließen sich in ihrer chemischen Zusammensetzung als wasserhaltige Al-Ca-Alkali-Silikate an die Leucit- und Feldspatgruppe an. Ueber die Rolle des Wassers in den Zeolithen herrscht noch nicht völlige Klarheit. Von der früher fast allgemein angenommenen Ansicht, daß kristallwasserhaltige Verbindungen vorlägen, ist man auf Grund neuer Experimente abgekommen. Dabei hatte sich ergeben, daß bei einer großen Anzahl von Zeolithen der Wassergehalt von der Dampfspannung der Umgebung abhängig ist und sich bei Temperatursteigerung stetig ändert. Das Wasser kann auch durch andere flüchtige Stoffe ersetzt werden. Man hält daher die Zeolithe heute meist für feste Lösungen oder Adsorptionsverbindungen. Je nach der Leichtigkeit, mit der die im Zeolithmolekül enthaltenen Alkalien zu Austauschreaktionen befähigt sind, unterscheidet man Aluminatsilikate und Tonerdedoppelsilikate. Bei diesen sind die Alkalien und alkalischen Erden wahrscheinlich an die Kieselsäure, bei jenen an die Tonerde gebunden (R. Gans).

Nach der von P. Groth stammenden Systematik sind die natürlichen Silikate Derivate folgender Kieselsäuren:



Durch Austritt von Wassermolekülen aus diesen beiden Säuren leiten sich die Polysäuren ab. Eine große Anzahl der natürlichen Silikate können als neutrale, basische und saure Salze der beiden einfachsten Säuren aufgefaßt werden. Durch Zusammentritt mehrerer Moleküle Ortho- bezw. Metakieselsäure und gleichzeitigem Austritt von einem Molekül H_2O entstehen die



Durch Austritt von Wasser aus mehreren Molekülen der bisher betrachteten Säuren läßt sich weiter noch eine große Mannigfaltigkeit von hypothetischen Polykieselsäuren ableiten, von denen Groth die Annahme der Trikieselsäure $Si_3O_8H_4$ und der Pentasäure $Si_5O_{12}H_4$ zur Erklärung der Konstitution der Silikate für ausreichend hält. Auch Groth teilt die natürlichen Silikate in die Hauptgruppen der wasserfreien und wasserhaltigen ein.

Beide Gruppen werden nach steigendem Kieselsäuregehalt in weitere Abteilungen zerlegt. Unter den wasserfreien Silikaten unterscheidet Groth: 1. basische Silikate, 2. orthokieselsaure Salze, 3. intermediäre Silikate, 4. metakieselsaure Salze, 5. polykieselsaure Salze. Die wasserhaltigen Silikate zerfallen in die Untergruppen: 1. Kristallwasserverbindungen der Silikate (Zeolithe), 2. kristallwasserhaltige Verbindungen von Silikaten mit Karbonaten, Sulfaten und Uranaten, 3. amorphe wasserhaltige Silikate. Bezüglich der Zeolithe ist man heute, wie bereits mitgeteilt, meist anderer Ansicht.

3. Entstehung und Synthese. Die natürlichen Silikate, aus denen der größte Teil der festen Erdrinde zusammengesetzt ist, sind auf verschiedene Art entstanden. Ihre Bildung ist sowohl durch Kristallisation aus dem Schmelzfluß, aus wässeriger Lösung, wie auch aus dem gasförmigen Zustand möglich (vgl. den Artikel „Mineral- und Gesteinbildung").

Bei der Synthese sucht man die Entstehungsbedingungen, die bei der Bildung der Silikate in der Natur wohl gewaltet haben, mehr oder weniger nachzuahmen. Es kommen daher auch hier die drei bei der Entstehung in der Natur bereits erwähnten Bildungsarten in Betracht. Am weitesten ist heute die Silikatsynthese aus dem Schmelzfluß entwickelt, der wohl auch in der Natur eine große Bedeutung zukommt. Entsprechend der Wichtigkeit der Silikatschmelzlösungen für die Silikatsynthese sei hier einiges darüber mitgeteilt.

Die Schmelztemperaturen der Silikate sind von der chemischen Zusammensetzung abhängig. Vergleicht man diejenigen analoger reiner Verbindungen, die nur ein Metall enthalten, so ist die Reihenfolge für die Metasilikate folgende: Pb (770°, Na (1056°), Li (1180°), Mn (1220°), Zn (1420°), Ba (1460°), Ca (1540°), Mg (1550°). Steigender Kieselsäuregehalt in Silikaten kann den Schmelzpunkt herabsetzen, wenn gleichzeitig der Ca- oder Mg-Gehalt steigt; wächst dagegen der Gehalt an Na oder Mn oder Fe, so erhöht SiO_2 den Schmelzpunkt. Es kommt also auf das Verhältnis RO : SiO_2 und auf den Umstand an, ob ein Silikat vorliegt, dessen RO schwieriger schmelzbar ist z. B. CaO, MgO oder leichter schmelzbar als das Kieselsäureanhydrid wie z. B. FeO, MnO. Fe und Mn erniedrigen stets den Schmelzpunkt; den gleichen Einfluß scheint Al in Kombination mit Ca, Mg auszuüben, während ein Zusatz von Al in den Alkalisilikaten erhöhend wirkt.

Maßgebend für das Verhalten der Silikate beim Schmelzen sind die lineare Kristallisationsgeschwindigkeit und das spontane Kristallisationsvermögen. Nach dem Kristallisationsvermögen lassen sich drei Gruppen der Silikate unterscheiden: 1) Silikate, die bei rascher Abkühlung (etwa 1 Minute) ganz kristallisieren: Li-, Ca-, Mg-, (Ca, Mg)-, Fe-, Mn-Silikate. 2) Solche, die bei rascher Abkühlung vollkommen glasig erstarren: Spodumen, Jadeit, Leucit, Albit, Orthoklas, Nephelin, also sämtlich Tonerdedoppelsilikate, ferner Na- und Pb-Silikate. Zu dieser Gruppe wären auch die technisch verwendbaren Gläser, z. B. Alkalikalksilikate, zu zählen. 3) Silikate, die bei rascher Abkühlung teilweise glasig erstarren: Anorthit (5% Glas), Diopsid (20% Glas), Labradorit (90% Glas).

In ähnlicher Weise wie die Schmelztemperatur und das Kristallisationsvermögen wird auch die Viskosität von der chemischen Zusammensetzung beeinflußt. Die wenigen bisher vorliegenden Messungen zeigen, daß eine Vermehrung des basischen Anteils einer Schmelze deren Viskosität erniedrigt, wäh-

rend sie durch SiO_2-Zusatz in jedem Fall erhöht wird.

Isomorphe Mischfähigkeit ist bei künstlichen Schmelzen und natürlichen Silikaten ziemlich verbreitet. Vollständige oder unvollständige Mischungsreihen finden sich bei den Schmelzen der einfachen Alkali- und Erdalkalimetasilikate. Von den natürlichen Mineralien wäre besonders die Feldspat-, Olivin- und Pyroxengruppe zu erwähnen.

Die Schmelzen der Silikate sind dissoziiert und verhalten sich wie Elektrolyte. Die Leitfähigkeit nimmt mit steigender Temperatur zu. Bei genügender Temperatursteigerung werden die Schmelzen von Silikaten, die im festen Zustand viele tausend Ohm Widerstand zeigen, fast ebenso leitend wie verdünnte Salzlösungen.

Während man sich früher damit begnügte, ein in der Natur vorkommendes Silikat herzustellen, untersucht man heute meist die thermischen, optischen und chemischen Eigenschaften des ganzen Systems von 2 oder 3 Komponenten, in dem das gesuchte Silikat als eine Verbindung oder auch als Mischkristall auftritt. Man gewinnt so einen tieferen Einblick in die Bildungsbedingungen und häufig auch in die Konstitution des Silikats.

4. Konstitution. Die Erkenntnis der chemischen Konstitution der Silikate ist mit großen Schwierigkeiten verbunden, die einerseits in der schweren Zersetzbarkeit oder Unlöslichkeit der Silikate, andererseits im Experiment, in der Deutung der Versuchsresultate wie auch in der Untersuchung der Substitutionsprodukte liegen.

Außer der rein theoretischen, meist sehr hypothetischen Betrachtung wurden auf experimentellem Wege zahlreiche Versuche angestellt, um Einblick in die chemische Konstitution der komplizierten Silikatmoleküle zu gewinnen.

Die Versuche von F. W. Clarke und seinen Mitarbeitern, welche bei hoher Temperatur die Silikate der Einwirkung von gasförmiger Salzsäure unterwarfen, konnten ebensowenig wie die Mineralsynthesen aus Schmelzfluß sichere Konstitutionsbestimmungen ergeben, weil bei der angewandten hohen Temperatur die Gefahr, daß das ursprüngliche Molekül zerstört wird, zu groß ist.

Auch die umfassenden Arbeiten von J. Lemberg und J. St. Thugutt, welche die Umsetzungsreaktionen einer Reihe von wasserhaltigen Silikaten in verschiedenen wässerigen Lösungen von Salzen und Basen studierten, liefern keine entscheidenden Konstitutionsbestimmungen, einmal weil die Untersuchungen nicht vollständig durchgeführt wurden, da meist nur die löslichen Bestandteile, nicht aber die unlöslichen Rückstände analysiert wurden, andererseits weil die Stabilität der entstandenen Verbindungen von der Temperatur abhängig ist.

G. Tschermak zersetzte die Silikate mit Salzsäure und schloß aus den Knicken der Entwässerungs-Zeitkurven auf die Existenz verschiedener Kieselsäuren. Da jedoch der Wassergehalt dieser meist gallertigen Kieselsäuren außer von der Vorbehandlung des Silikats auch von der Entwässerungstemperatur abhängig ist, so kann vorläufig auch aus diesen Versuchen nicht viel über die Konstitution geschlossen werden.

Die Alumosilikate sind z. T. feste Lösungen von einfach zusammengesetzten Silikaten. Außer den triklinen Feldspäten, für welche die Mischungstheorie bereits seit längerer Zeit angenommen ist, sind wohl auch die Glimmer, Skapolithe, Chlorite, Granate u. a. isomorphe Mischungen teils mit bekannten in der Natur vorkommenden Komponenten, teils mit solchen, die nur aus den Analysen berechnet werden können. Sehr wahrscheinlich sind viele Silikate von komplexer Zusammensetzung, teils aus Molekülverbindungen, teils aus festen Lösungen aufgebaut.

Schwierig ist auch die Erkenntnis von Isomerien, auf die in neuerer Zeit das Augenmerk gerichtet wurde. Nach P. Groth sind Andalusit und Disthen metamer. Dieser Ansicht schließt sich auch A. Heydrich (Ztschr. f. Kristallographie 1911. 48. 243) auf Grund der Bestimmungen des spezifischen Brechungsvermögens an. Er hält die beiden Mineralien für wahrscheinlich stellungsisomer. Dem widersprechen aber die Versuche von C. Doelter, der für Andalusit und Disthen die gleiche Löslichkeit in verschiedenen Lösungsmitteln fand.

In vielen der neueren Konstitutionsarbeiten wird als Kern ein einfaches Alumosilikat vorausgesetzt, an welches sich entweder ein zweites, SiO_2, oder ein Aluminat anlagert. Über die Natur dieser Kerne läßt sich meist nichts Sicheres aussagen; man kann ein einfaches Alumoorthosilikat oder Alumometasilikat (Tonkieselsäure Vernadskys) annehmen oder bereits komplexe Alumosilikate wie den hypothetischen Glimmer- oder Chloritkern W. Vernadskys oder den aus den Experimentaluntersuchungen von Thugutt sich ergebenden Kern $R_2Al_2Si_3O_{10}$.

Manchmal hat man die Konstitution der Silikate durch Vergleich mit den Kohlenstoffverbindungen zu lösen gesucht. Viele Strukturformeln lehnen sich an jene der organischen Chemie an. So sind auch die Strukturformeln von W. und D. Asch dem Benzolring nachgeahmt. Nach dieser Ansicht bestehen die Alumosilikate aus der wechselnden Verkettung von Silicium- und Aluminiumringen. Auch dieser geistreiche Erklärungsversuch ist stark hypothetisch und kann

durch keine sicheren experimentellen Belege gestützt werden, da es nicht wie beim Benzolring gelingt, allmählich Atomgruppen zu ersetzen, sondern meist eine radikale Zerstörung der Silikate eintritt, die eine weitere Prüfung unmöglich macht.

Die Anschauungen über die Konstitution der Silikate weichen heute stark voneinander ab, da im allgemeinen keine gefestigten Theorien vorliegen, die dazu noch ihrerseits fortwährendem Wechsel unterworfen sind.

Literatur. *Die sehr zahlreiche Literatur findet sich in den chemischen, mineralogischen und geologischen Fachzeitschriften. An zusammenfassenden Werken, aus denen auch die ausführliche Literatur zu entnehmen ist, seien hier nur folgende genannt:* **W.** *und* **D. Asch,** *Die Silikate in chemischer und technischer Beziehung. Berlin 1911.* — **C. Doelter,** *Handbuch der Mineralchemie. Dresden 1911 bis 1914.* — **C. Hintze,** *Handbuch der Mineralogie. Bd.* **2**: *Silikate und Titanate. Leipzig 1898.* — **J. H. L. Vogt,** *Die Silikatschmelzlösungen. Kristiania 1903 bis 1904.*

K. Endell.

Silurformation.

1. Name und Allgemeines. 2. Petrographischer Charakter. 3. Paläontologischer Charakter. 4. Allgemeine Gliederung. 5. Verbreitung: a) Die periarktische Provinz. b) Die mediterrane Provinz. 6. Nutzbare Mineralien und Gesteine.

1. Name und Allgemeines. Die Silurformation ist die zweite der fünf großen Formationen des Paläozoikums und entspricht einem Teile des „Uebergangsgebirges“ oder der „Grauwackenformation“ der älteren geologischen Literatur. Die Kenntnis der Formation ist von England ausgegangen. Dort gliederte R. Murchison zuerst 1835 einen Teil jenes Uebergangsgebirges als selbständige Formation ab und nannte diesen nach dem alten britischen Volksstamm der Silurer, die zur Zeit Cäsars in Wales wohnten, Silur.

Der Begriff Silur hat mehrfach seine Bedeutung gewechselt. Früher bezog man darin auch das unterliegende Kambrium mit ein. In Nordamerika und teilweise auch in England und Frankreich wird mit dem Worte Silur nur das Obersilur bezeichnet und das Untersilur als eine besondere Formation unter dem Namen Ordovicium abgegliedert. Indem wir die ursprüngliche Fassung von Murchison beibehalten, bezeichnen wir als Silur die im Liegenden der devonischen Formation, in England des dem Devon entsprechenden Oldreds, und im Hangenden des Kambriums auftretenden Schichten. Bereits Murchison gliederte die Formation in Unter- und Obersilur. Später stellte es sich heraus, daß sowohl diese, als auch die genauere englische Gliederung für die silurischen Ablagerungen der ganzen Welt gültig ist. Besonders J. Barrande wies dies für die fossilreichen böhmischen Silurablagerungen nach.

2. Petrographischer Charakter. Das Silur stellt eine sehr mächtige Gesteinsfolge dar, deren Dicke bei vollständiger Entwickelung vielleicht 15 bis 20 km betragen mag. Die Hauptmasse bilden Grauwacken, Sandsteine und Tonschiefer mit untergeordneten Kalkeinlagerungen und zahlreichen Eruptivgesteinen. Die sandigen Schichten enthalten vielfach Konglomerate, besonders an der (lokalen) Basis der Schichtenfolge, wo diese ungleichförmig ältere Stufen überlagert. Zuweilen sind diese Konglomerate sehr mächtig, wie z. B. im englischen Llandovery. Die tonigen Schichten sind meistens als harte Schiefer ausgebildet und nehmen in einigen Gebieten, wo sie einem intensiven Zusammenschub ausgesetzt waren, sogar kristallinische Beschaffenheit an, z. B. in Norwegen. Kalkige Schichten treten im europäischen Silur im allgemeinen sehr zurück, gehören dagegen in Nordamerika (Vereinigte Staaten und Canada) zu den verbreitetsten Silurgesteinen. Im westlichen Nordamerika setzen Kalke sogar den größten Teil der Formation zusammen. Besonders in Nordwesteuropa sind als bezeichnende Gesteine des Silur schwarze anthrazitische Schiefer sehr verbreitet, die trotz ihrer zuweilen geringen Mächtigkeit oft weithin verfolgt werden können. Da sie meist reich an zersetztem Schwefelkies sind, welcher Ausblühungen von Alaun hervorruft, bezeichnet man sie in Skandinavien gewöhnlich als Alaunschiefer. Diesen entsprechen in Schottland und dem englischen Seengebiet die Graptolithenschiefer. Ihr schwarzes kohleartiges Aussehen hat zu vielen fruchtlosen Schürfversuchen auf Kohlen Veranlassung gegeben.

Nach unten ruhen die silurischen Schichten gewöhnlich mit gleichförmiger Lagerung auf dem Kambrium auf oder transgredieren auf ältere kristalline Gesteine. Sie liegen meist nicht mehr ungestört, sind vielmehr stark gefaltet, überschoben und zum Teil regionalmetamorph verändert. Nur im Staate New York, im südlichen Schweden und im Baltikum liegen sie noch horizontal oder wenig geneigt. Nach oben geht das Silur gewöhnlich ganz allmählich in die untersten Devonschichten über, ohne daß das petrographische Verhalten sich merklich ändert. Daher wird die Bestimmung der oberen Grenze des Silur zuweilen sehr schwierig und hängt mehr oder minder von paläontologischen Erwägungen ab.

3. Paläontologischer Charakter. Der faunistische Unterschied zwischen dem Silur und dem voraufgehenden Kambrium ist ein ungemein scharfer. Nur ein kleiner Teil der Fauna kann als überlebender Rest der kambrischen Fauna betrachtet werden. Die meisten Gruppen der Evertebraten, soweit sie fossil erhaltungsfähig sind, treten von der Basis der Formation an auf und zwar zum großen Teil unvermittelt, d. h. ohne daß man die Vorläufer, die im Kambrium zu suchen wären, kennt. Es hängt das vermutlich mit dem Facieswechsel zusammen, der den Beginn des Silur bezeichnet. Denn während wir aus dem Kambrium fast nur sandige Ablagerungen kennen, beginnen jetzt kalkige und kalkig-tonige Sedimente mit ihren reichen, von den sandigen sehr abweichenden Faunen.

Als besonders bezeichnend für das Silur können die Graptolithen angesehen werden, die fast ausschließlich auf diese Formation beschränkt sind, ferner verschiedene Gattungen von Spongien, Tabulaten und Tetrakorallen, Cystoideen, Bryozoen, Brachiopoden, Cephalopoden und besonders von Trilobiten. Zahlreiche Gruppen erreichen im Silur ihre höchste Entfaltung, d. h. ihren größten Formenreichtum, so die Cystoideen die Paläoconchen, die Capuliden, Nautiliden, Ostracoden und Trilobiten. Mehrere Gruppen, die im Kambrium stark vertreten sind, sind im Silur im Rückgang begriffen. Einige, wie die Oleniden und Agnostiden sind im Untersilur noch vorhanden, im Obersilur aber bereits verschwunden.

Manche Gruppen, wie z. B. die Ammonoideen, die Panzerfische, die Selachier, die ihre volle Entwickelung erst im Devon erlangen, erscheinen bereits im Silur. Mit dem Auftreten des höchsten Tierstammes, der Wirbeltiere (die ersten Spuren schon im tiefen Untersilur, vollständigere Reste im Obersilur), sind sämtliche Tierstämme seit dieser Formation vorhanden.

Im einzelnen ist folgendes über die Tierwelt zu bemerken.

Von Protozoen sind bekannt Foraminiferen (Lagena, Saccamina), z. B. aus den Glaukonitsanden Rußlands und Radiolarien in einer Anzahl von Gattungen und Arten aus Kieselschiefern Schottlands, des Königreichs Sachsen u. a. O.

Die Spongien sind noch gering entwickelt. Bezeichnend sind unter den Silicispongien Formen wie Aulocopium (Fig. 1) und Astylospongia (Fig. 2) im Untersilur, Hindia im Obersilur. Die Hexactinelliden sind noch unwichtiger (Astraeospongia u. a.).

Von Formen zweifelhafter Stellung, die vielleicht zu den Spongien zu stellen sind, seien Receptaculites und Ischadites genannt.

Korallen sind hauptsächlich im Obersilur häufig, wo auch die ältesten bekannten

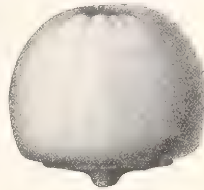


Fig. 1. Aulocopium aurantium Osw.

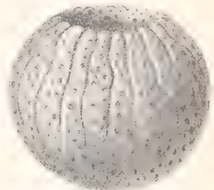


Fig. 2. Astylospongia praemorsa F. Rö.

Riffbildungen (Gotländer Kalk, Wenlockkalk) auftreten. Von den zahlreichen obersilurischen Gattungen seien erwähnt: die Tetrakorallen Streptelasma (Fig. 3), Cyathophyllum (Fig. 7), Ptychophyllum, Petraia, Omphyma, Cystiphyllum, Strombodes, Acervularia, ferner die tabulaten Korallen Favosites (Fig. 4), Pachypora, Alveolites (Fig. 5), Heliolites (Fig. 6), Syringopora (Fig. 8) und die sehr bezeichnende Kettenkoralle Halysites (Fig. 9) mit der Hauptart Halysites catenularia Linn. Eine tabulate Koralle des Untersilur ist Monticulipora (Fig. 10).

Von Hydrozoen sei zunächst die Gattung Stromatopora (Fig. 11) genannt, die sich mit ihren aus zahlreichen konzentrisch übereinander liegenden Kalkblättern bestehenden kugeligen bis brotlaibförmigen Stöcken an dem Aufbau der obersilurischen Korallenriffe beteiligt.

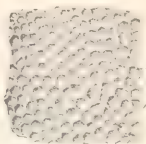
Die schon aus dem obersten Kambrium bekannte Gattung Dictyonema (Fig. 12) bedeckt mit ihren fächerförmigen Netzen zuweilen weithin die Schiefer und liefert an der Basis des Silur den wichtigen Leithorizont der Dictyonemaschiefer.

Die wichtigsten Hydrozoen, besonders für die genauere Einteilung der Formation, sind die Graptolithen. Sie sind ähnlich den heute lebenden Sertularien gebaut und höchst wahrscheinlich auch mit ihnen verwandt. Infolge ihrer Lebensweise als planktonische Schwimmer erlangten sie weltweite Verbreitung, besonders in der pelagischen Schieferfacies. Hier finden sich ihre chitinösen Hartgebilde als schwarze, glänzende, kohlige, sägeartig gezähnte Stäbe flachgedrückt in großen Mengen auf den Schieferflächen. Vielfach treten sie aber

auch in bituminösen Kalken auf und sind dann gewöhnlich körperlich erhalten. Früher hielt man sie für festgewachsene Formen, die, mit ihrer Spitze im Meeresboden



Fig. 3. Streptelasma europaeum F. Ro.



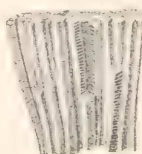


Fig. 4. Favosites Forbesi M. E. u. H.

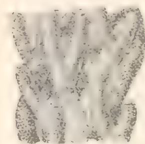


Fig. 5. Alveolites repens M. E. u. H.

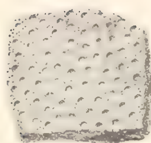


Fig. 6. Heliolites interstincta M. E. u. H.



Fig. 7. Cyathophyllum articulatum Hisinger.



Fig. 8. Syringopora bifurcata Lonsd.

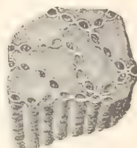


Fig. 9. Halysites catenularia M. E. u. H.

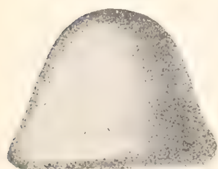




Fig. 10. Monticulipora petropolitana M. E. u. H.

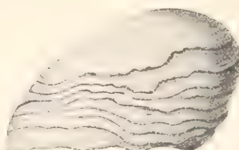




Fig. 11. Stromatopora striatella d'Orb.

steckend, in großer Menge beieinander lebten (sogenannte Graptolithenwiesen). Durch glückliche Funde im Untersilur von Nordamerika ist über den Bau und die Lebensweise der Graptolithen jetzt etwas größere Klarheit geschaffen worden. Danach sind es Tierkolonien, die nach Art der heute lebenden Siphonophoren vermittels einer mit Luft gefüllten häutigen Blase, des sogenannten Pneumatophors, frei schwammen. Unter diesem Pneumatophor befanden sich die Fortpflanzungsorgane, die Gonangien, und die radiär nach unten ausstrahlenden Aeste mit den Freßpolypen, die eigentlichen uns heute vorliegenden Graptolithen.

Man unterscheidet einzeilige und zwei- bis mehrzeilige Formen, je nachdem an der Achse des Graptolithenstäbchens eine oder mehrere Reihen von Polypen anhaften. Während die zwei- und mehrzeiligen Graptolithen (Leptograptus, Stephanograptus, Didymograptus, Phyllograptus, Lasiograptus, Tetragraptus, Dichograptus, Dicellograptus und Dicranograptus) auf das Untersilur beschränkt sind, kennzeichnen die einzeiligen

Formen (Monograptus [Fig. 13], Rastrites Cyrtograptus) das Obersilur. Dem Ober- und Untersilur gemeinsam sind die Gattungen Diplograptus, Climacograptus und Retiolites (Fig. 14). Durch ihre weite Verbreitung bei gleichzeitiger kurzer Lebensdauer geben die Graptolithen vorzügliche Leitfossilien ab. Lapworth hat nach ihnen das schottische Untersilur in 8, das Obersilur in 11 Zonen geteilt, die sich auch außerhalb Schottlands vielfach in genau der gleichen Reihenfolge haben nachweisen lassen.



Fig. 12. Dictyonema cavernosum Wiman.



Fig. 13.



Fig. 14.

Fig. 13. Monograptus ludensis Murch.
Fig. 14. Retiolites Geinitzianus Barr.

Sehr individuen- und artenreich sind die Echinodermen, hauptsächlich die Crinoiden, Echiniden und Asteroiden, während die neuerdings aus dem Kambrium bekannt gewordenen Holothurien sich im Silur bisher noch nicht gefunden haben. Von untersilurischen Formen der Crinoiden seien Archaeocrinus, Hybocrinus, Anomalocrinus und Dendrocrinus genannt, von obersilurischen Scyphocrinus, Melocrinus, Cyathocrinus, Taxocrinus, Crotalocrinus (Fig. 15) und Ichthyocrinus. Die Cystideen erreichen, wie schon erwähnt, im Silur ihre höchste Entwickelung. Ueber 200 Arten sind bereits bekannt geworden. Stratigraphische Bedeutung hat die untersilurische Gattung Echinosphaerites. Die Blastoideen sind durch die sehr primitive Gattung Asteroblastus vertreten. Sehr selten sind die Ophiuriden (Eucladia, Protaster), häufiger sind dagegen Asteroiden (Palaeaster, Palaeocoma, Lepidaster).

Die ältesten bekannten Seeigel treten im Untersilur auf mit der Gattung Bothriocidaris; obersilurisch sind die Gattungen Palechinus und Echinocystis.

Anneliden sind durch die langlebigen Gattungen Serpula und Spirorbis vertreten. Auch zahlreiche Kriechspuren auf Schiefern und Sandsteinen deuten auf das Vorkommen von Würmern. Man bezeichnet diese Kriechspuren je nach ihrem Aussehen als Arenicolites, Nereïtes, Scolithus, Crossopodia usw. Auch Annelidenkiefer, die früher mehrfach als Fischzähnchen gedeutet worden sind, finden sich vielfach, besonders in den Kalken des Obersilur (Conodonten).

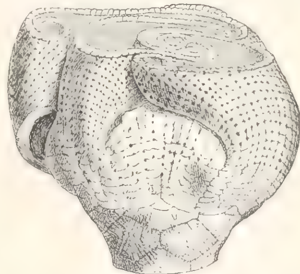


Fig. 15. Crotalocrinus pulcher Hisinger.

Bryozoen in beträchtlicher Zahl und Mannigfaltigkeit finden sich schon im Untersilur. Die obersilurischen Riffkalke enthalten gleichfalls überall Bryozoen (Fenestella [Fig. 16]).

Nächst den Graptolithen sind die Brachiopoden die häufigsten Fossilien. Es sind bereits über 2500 Arten beschrieben worden. Während im Kambrium die schloßlosen, hornschaligen Brachiopoden vorherrschen, und schloßtragende nur ganz

vereinzelt (Orthis) auftreten, beginnen von der Basis des Silur an die schloßtragenden Brachiopoden immer mehr an Bedeutung zu gewinnen.

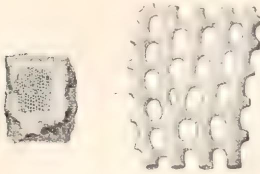


Fig. 16. Fenestella sp.

Für das ganze Silur bezeichnend sind die Gattungen Orthis (Fig. 26), Leptaena (Fig. 27), Strophomena (Fig. 27a). Ganz auf das Untersilur beschränkt sind die sehr bemerkenswerten Kollektivtypen Porambonites (Fig. 17) und Platystrophia (Fig. 18), sowie die Gattung Orthisina (Fig. 19). Mit Beginn des Obersilur treten zahlreiche neue Gattungen auf, vor allen die Pentameren, und zwar zuerst mit glatten Formen P. oblongus, esthonus (Fig. 20), borealis u. a.), zu denen sich später die gerippten Formen gesellen (P. Knighti, galeatus u. a.), ferner finden sich hier zuerst die Gattungen: Spirifer (Fig. 21), Retzia, Atrypa (Fig. 22), Merista, Meristella u. a. Rhynchonella, die schon im Untersilur vorhanden ist, wird erst im Obersilur häufig, desgleichen Chonetes (Fig. 23) und Terebratula (Dielasma).

Die Mollusken sind mit ihren sämtlichen 5 Klassen reichlich vertreten, im Gegensatz zu ihrer großen Seltenheit im Kambrium. Unter den Lamellibranchiaten haben besondere Bedeutung die schloßlosen Palaeoconchen (Cardiola interrupta (Fig. 24)), die Taxodonten und Modioliden.

Die Gastropoden beginnen im tiefen Untersilur mit dickschaligen Formen (Maclurea), außerdem sind aus dem Untersilur noch Pleurotomaria (Fig. 28), Omphalotrochus, Holopea und ferner aus dem Obersilur Turbo, Bellerophon (Fig. 29), Euomphalus, Macrocheilus zu nennen. Die Scaphopoden sind durch Formen wie Dentalium, Conularia,



Fig. 17.



Fig. 18.

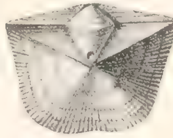


Fig. 19.





Fig. 20.



Fig. 21.



Fig. 22.



Fig. 23.

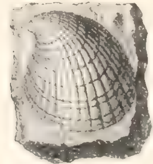


Fig. 24.

Fig. 17. Porambonites aequirostris d'Orb.
Fig. 19. Orthisina anomala d'Orb.
Fig. 21. Spirifer elevatus Dalm.
Fig. 23. Chonetes striatella Dalm.

Fig. 18. Platystrophia lynx Eichw.
Fig. 20. Pentamerus esthonus Eichw.
Fig. 22. Atrypa reticularis Linn.
Fig. 24. Cardiola interrupta Brod.

Tentaculites (Fig. 25), die Amphineuren durch Helminthochiton vertreten.

Die Cephalopoden entwickeln sich gleichfalls erst im Verlauf des Silur, während aus dem Kambrium nur erst zweifelhafte Formen (Volborthella) bekannt sind. Von den Nautiloideen herrschen im Untersilur die verschiedenen Formen der Gattung Endoceras (Fig. 30) vor, die durch dicken, randständigen Sipho ausgezeichnet sind und die Gattung Lituites (Fig. 31), die in ihrer Jugend spiralig aufgerollt ist und in späteren Stadien gerade fortwächst. Im Obersilur werden die Endoceraten durch die echten Orthoceraten (Fig. 32) und ihre Nebenformen (Cyrtoceras, Gomphoceras, Phragmoceras [Fig. 33]), sowie die Nautileen (Ophioceras, Trochoceras, Ascoceras) abgelöst. Endlich sind neuerdings die ersten echten Goniatiten im Obersilur des Kellerwaldes und der karnischen Alpen nachgewiesen worden mit den Gattungen Anarcestes, Agoniatites, Tornoceras u. a.

Unter den Crustaceen haben die Trilobiten die meiste Bedeutung. Sie erreichen hier ihre größte Entwickelung. Aus dem Kambrium gehen nur wenige Gattungen in das Silur hinauf (Agnostus, Asaphus [Fig. 34]). Dazu treten im Untersilur zahlreiche neue Gattungen (Harpes [Fig. 35], Trinucleus [Fig. 36], Triarthrus, Ogygia, Illaenus [Fig. 37,] Lichas, Acidaspis, Calymmene [Fig. 38], Sphaerexochus). Manche davon haben weltweite Verbreitung, wie Agnostus, Asaphus, Illaenus, Lichas, Calymmene. Die meisten jedoch sind nur auf ein verhältnismäßig kleines Gebiet beschränkt, außerhalb dessen sie entweder gar nicht oder nur als große Seltenheit auftreten. Vom Obersilur an kommen folgende Gattungen, die weiter in das Devon hinaufgehen, zu den Genannten hinzu: Phacops (Fig. 39), Proetus, Bronteus, Cyphaspis, Arethusina. Nur obersilurisch ist die Gattung Encrinurus (Fig. 40).



Fig. 25.

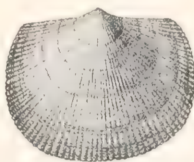


Fig. 26.



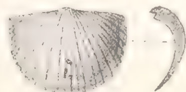


Fig. 27.

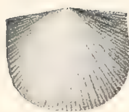


Fig. 27a.



Fig. 28.

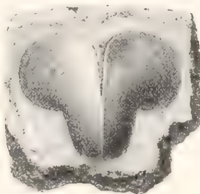


Fig. 29.



Fig. 30.

Fig. 25. Tentaculites ornatus Sow. Fig. 26. Orthis solaris v. Buck.
Fig. 27. Leptaena sericea Sow. Fig. 27a. Strophomena filosa Sow.
Fig. 28. Pleurotomaria elliptica Fr. Schmidt. Fig. 29. Bellerophon expansus Sow.
Fig. 30. Endoceras vaginatum Schloth.

Unter den Ostracoden sind wichtig: Leperditia (Fig. 41), Isochilina, Beyrichia (Fig. 42), Kloedenia. Die Phyllocariden sind z. B. durch Ceratiocaris vertreten.

Von großem Interesse ist die, neuerdings auch aus dem Kambrium bekannt gewordene Gruppe der Eurypteriden (Gattungen: Eurypterus [Fig. 43], Pterygotus, Stylonurus), da sie die größten Kruster enthält, die jemals gelebt haben. Stylonurus wird bis zu 2 m lang.

Die ersten Spuren von Wirbeltieren finden sich im Untersilur, sicher bestimmbare Reste aber erst vom Obersilur an. Sie gehören hauptsächlich zu der primitiven Gruppe der Panzerfische (Ostracodermen). Die

wichtigsten obersilurischen Gattungen, die z. T. aber erst im Devon ihre Hauptentwickelung erfahren, sind Pteraspis, Cyathaspis (Fig. 44), Cephalaspis, Thyestes. stachel (Onchus [Fig. 45]) und Chagrinschuppen

In neuester Zeit sind durch Traquair noch einige in ihrem äußeren Habitus den



Fig. 31.



Fig. 32.



Fig. 33.

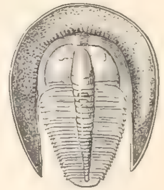


Fig. 35

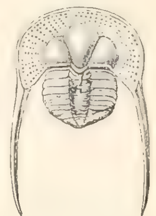


Fig. 36.



Fig. 34.

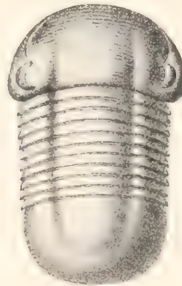


Fig. 37.

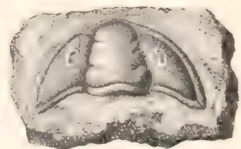


Fig. 38.

Fig. 31. Lituites lituus Montf.
Fig. 32. Orthoceras gregarium Sow.
Fig. 33. Phragmoceras arcuatum Sow.
Fig. 34. Asaphus expansus Dalm.
Fig. 35. Harpes ungula Barr.
Fig. 36. Trinucleus Goldfußi Barr.
Fig. 37. Illaenus crassicauda Dalm.
Fig. 38. Calymmene Blumenbachi Brgn.

Sie sind durch die beträchtliche Stärke ihres Hautpanzers und das Fehlen des Unterkiefers und der Extremitäten, sowie echter Knochenbildungen gekennzeichnet.

Außerdem finden sich noch Reste von Selachiern, jedoch meistens nur Flossen- echten Fischen gleichende Formen aus dem obersten Silur von Schottland bekannt gemacht und mit den Namen Lanarkia, Birkenia (Fig. 46) und Lasanius bezeichnet worden.

Reste von Landwirbeltieren kennt man

bisher noch nicht. Dagegen sind Reste von Arachniden und zwar Skorpionen (Palaeophonus [Fig. 47], Proscorpius) aus Gotland und dem Staate New York beschrieben worden und auch Myriapodenreste (Archidesmus) und Insekten (Palaeoblattina, Protocimex) sind bekannt.

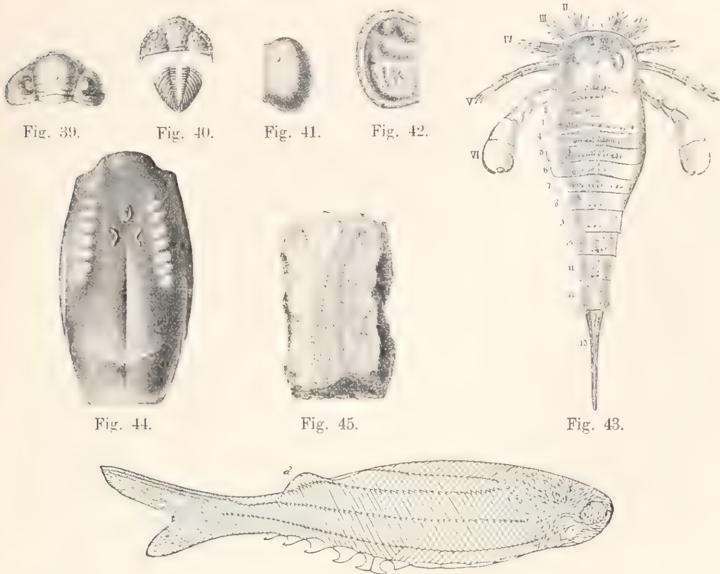


Fig. 39. Phacops (Acaste) Downingiae Murch. Fig. 40. Encrinurus multisegmentatus Nieszk.
Fig. 41. Leperditia Angelini Fr. Schmidt. Fig. 42. Beyrichia tuberculata Klöden.
Fig. 43. Eurypterus Fischeri Eichw. Fig. 44. Cyathaspis nteger Kunth.
Fig. 45. Onchus granulatus F. Roem. Fig. 46. Birkenia elegans Traq.

Flora. Die Kenntnis der silurischen Flora. ist noch äußerst lückenhaft. Die meisten bisher entdeckten Pflanzen sind Algen (Bythotrephis, Palaeophycus). Am Aufbau der Riffkalke beteiligen sich zuweilen Kalkalgen (Girvanella). Auch Landpflanzen sind nachgewiesen, z. B. in den silurischen Plattenschiefern des Harzes, unterscheiden sich jedoch nur wenig von den jüngeren carbonischen Resten, so beispielsweise Stigmaria, Sphenopteridium und ?Asterocalamites im Silur des Harzes, Lepidodendron im Obersilur Böhmens. Die Landflora des Silur scheint demnach eine Cryptogamenflora gewesen zu sein, in der Lycopodien und Farne vorherrschten.

4. Gliederung des Silur. Infolge der großen petrographisch-faciellen und demgemäß auch faunistischen Verschiedenheit der Ausbildung in den einzelnen



Fig. 47. Palaeophonus nuncius Thorell u. Lindstroem.

Verbreitungsgebieten läßt sich keine durchgängig gültige Gliederung des Silur für die ganze Erde aufstellen. Ueberall scheint jedoch wenigstens die von Murchison herrührende Zweigliederung in Unter- und Obersilur zuzutreffen, wenn auch z. B. in Nordamerika das Untersilur (Ordovicium) das Obersilur an Dauer und Mannigfaltigkeit der Zusammensetzung beträchtlich zu übertreffen scheint. Eine Anzahl weithin verfolgbarer Horizonte erlangt größere Bedeutung für den Vergleich und die Parallelisierung der Silurschichten in den verschiedenen Ländern. Es sind das im Untersilur der Dictyonemahorizont an der Basis der Formation, etwas höher die Fauna mit Euloma-Niobe und an der oberen Grenze des Untersilur die Trinucleuszone, ferner zu Beginn des Obersilur der Horizont mit den glatten Pentameren, die Zone mit Cardiola interrupta und im obersten Silur die Schichten mit Eurypteriden.

5. **Verbreitung.** Die Verteilung von Wasser und Land hat im Verlauf der Silurperiode mehrfach gewechselt. Im Untersilur scheinen mehrere, zeitweilig durch trennende Landbarren gegeneinander abgeschlossene Meeresprovinzen bestanden zu haben, in denen sich die verschiedenen Faunengemeinschaften in etwas abweichender Weise entwickelten. Doch fand andererseits durch gelegentliche Verbindung der Provinzen untereinander wieder ein Austausch der Faunen statt, so daß sich die entstandenen Unterschiede wieder etwas ausglichen. Mit Frech kann man für das Untersilur allein folgende 5 größere, in sich einheitliche Gebiete unterscheiden: 1. Das böhmisch-mediterrane Meeresbecken, 2. das baltische Meeresbecken, 3. das nordatlantische Meeresbecken, 4. das pazifisch-nordamerikanische Meeresbecken, 5. das Gebiet der Graptolithenschieferentwickelung. Im Obersilur verschwinden diese örtlichen Unterschiede mehr und mehr. Ein weites, fast alle diese Meere des Untersilur in sich aufnehmendes Weltmeer, das periarktische Meer entsteht. Nur das böhmische Becken behält auch im Obersilur seine Selbständigkeit. Nach Kayser sind jedoch auch im Untersilur die Gegensätze nicht so groß, daß man diese für das Obersilur geltende Zweiteilung nicht auch dort anwenden könnte. Es läßt sich demnach eine naturgemäße Einteilung der Verbreitung des ganzen Silur in nur zwei große Faciesgebiete durchführen:

a) Das Gebiet der periarktischen Entwickelungsform, das bei weitem die Hauptmasse aller Silurgebiete umfaßt und dem das Silur von ganz Nordeuropa (England, Skandinavien, Baltikum, Polen, Galizien, Belgien, Nordfrankreich), Nordamerika, Grönland, Sibirien, Asien, Südamerika und Australien zuzurechnen ist und

b) das viel beschränktere Gebiet der böhmischen oder mediterranen Entwickelungsform, dem außer Böhmen das Silur der deutschen Mittelgebirge, der Alpen und der Mittelmeerländer zuzurechnen ist.

5a) Die periarktische Entwickelungsform.

1. Großbritannien. Den Ausgangspunkt für die Gliederung des Silur bildet England, wo schon Murchison eine eingehende und im wesentlichen noch heute geltende Einteilung geschaffen hat. Hier beginnt in Wales die Schichtenfolge mit dem Tremadoc, einer sehr mächtigen schieferigen bis schieferig-sandigen Ablagerung mit gelegentlichen Einlagerungen von oolithischen Eisenerzen. An seiner Basis liegt der Horizont mit Dictyonema socialis. Paläontologisch ist das Tremadoc durch die Trilobitengattungen Ogygia, Asaphus, Euloma, Niobe und Aeglina gekennzeichnet. Das darauf folgende, bis 700 m mächtige Arenig ist petrographisch ähnlich zusammengesetzt. Hier tritt bereits die für die Gliederung des Untersilur wichtige Trilobitengattung Trinucleus auf. Die überlagernden Llanvirn- und Llandeiloschichten, dunkle, graue, zuweilen kalkige Sandsteine mit Schiefereinlagerungen enthalten vorwiegend Graptolithen und Trilobiten (Asaphus, Ogygia). Eine überaus mächtige Folge von Schiefern und Sandsteinen mit gelegentlichen Kalkeinlagerungen schließt das Untersilur ab, die Bala- oder Caradoc-Schichten. Sie enthalten zahlreiche Versteinerungen, namentlich mannigfaltige Brachiopoden (Orthis) und Trilobiten (Trinucleus), die bemerkenswerte Beziehungen zu skandinavischen und böhmischen Formen aufweisen.

Das Obersilur beginnt mit dem Llandovery, das durch das unvermittelte Auftreten großer glattschaliger Formen von Pentamerus gekennzeichnet ist. Die vorwiegend sandige Schichtenfolge enthält gelegentlich sogar Konglomerate und weist hierdurch, sowie durch die vielfach zu beobachtende ungleichförmige Lagerung auf dem Untersilur auf Transgressionsvorgänge zu Beginn des Obersilur hin. In seinem oberen Teile ist das Llandovery häufig ganz als Graptolithenschiefer ausgebildet. Es sind das die sogenannten Tarannonschiefer.

Die nächstfolgende Wenlockstufe beginnt mit tonig-kalkigen Schichten und entwickelt sich nach oben immer kalkreicher. Es bilden sich Korallenkalkbänke aus, die eine sehr reiche Riffauna enthalten. Aber auch Kalkalgen (Girvanella)

beteiligen sich am Aufbau dieser Riffkalke. Eine seit langer Zeit weltberühmte Fundstelle im Wenlock ist Dudley.

Das oberste Silur, die Ludlowstufe, ist vorwiegend tonig-kalkig, mit einer größeren reiner kalkigen Einlagerung, dem Aimestrykalk. Nach oben wird diese Stufe jedoch immer sandiger, um endlich durch die Uebergangsschichten der sogenannten Passage beds ganz allmählich in die rein sandige Facies des devonischen Oldred überzugehen. Erwähnung verdient eine diesen Schichten eingelagerte, aus Resten von Crustaceen, Fischen, Pflanzen und hornschaligen Brachiopoden bestehende Breccie mit den riesigen Eurypteriden Pterygotus und Eurypterus. Diese Schichten stellen offenbar den Uebergang der marinen Silurschichten in das brackische Oldred dar.

Diese bisher besprochene, in Wales, Shropshire und anderwärts verbreitete Ausbildung des englischen Silur wird weiter nach Norden, im englischen Seengebiet, durch die Graptolithenschieferfacies abgelöst. Diese Ablagerungen sind, wie aus ihrer Fauna (Graptolithen, Radiolarien, Spongien) hervorgeht, in tieferem Meere entstanden.

Das Untersilur wird von den Skiddaw-Schiefern eingenommen, die zeitlich etwa dem Tremadoc bis Llandeilo entsprechen. Eine mächtige Eruptiveinlagerung stellen die darauf folgenden Borrowdaleschichten dar. Dem oberen Untersilur, also etwa den Caradocschichten ist der überlagernde Conistonkalk wegen seiner Trilobitenfauna (Trinucleus, Chasmops) gleichzustellen.

Das Obersilur besteht aus mächtigen Graptolithenschiefern, den Stockdale- und Bannisdaleschiefern, die durch eine sandige Ablagerung, den Conistonsandstein, getrennt werden. Das ganze Silur des Seengebietes hat Lapworth nach den Graptolithen in 20 Zonen eingeteilt.

Gleichfalls vorwiegend schiefrig ist das Silur Schottlands entwickelt, das im Norden und Süden des Landes nur wenige hundert Meter mächtig ist, aber an der Westküste, im Girvandistrikt, bedeutende Mächtigkeit erreicht. An der Basis sind hier den Graptolithenschiefern Radiolarienhornsteine eingelagert. Außerdem treten ausgedehnte Lager von Eruptivgesteinen und Tuffen auf.

Das noch nicht genügend erforschte irische Silur scheint sich mehr an die skandinavische als die englische Ausbildung anzuschließen.

2. Skandinavien. Auf der skandinavischen Halbinsel nimmt das Silur bedeutende Flächenräume ein. In Schweden ist es besonders in Schonen, Westergötland und Jemtland verbreitet. Die Inseln Oeland und Gotland bestehen ausschließlich aus silurischen Gesteinen. Im allgemeinen sind die Lagerungsverhältnisse des Silur in Schweden wenig gestört. Im südlichen Teile des Landes liegen die Schichten fast wagerecht. Dieser Umstand, sowie der große Fossilreichtum des schwedischen Silurs haben das Land seit langer Zeit zu einem klassischen Gebiet für die Kenntnis der Formation gemacht. In Schonen wiegt, wie bereits im Kambrium, die Schieferfacies vor, während im ganzen übrigen Schweden die Kalkfacies herrscht. Auch hier beginnt, wie in England, die Formation mit dem Dictyonemahorizonte. Darüber folgen schwarze Schiefer mit bituminösen Kalken, die paläontologisch durch die Trilobitengattungen Megalaspis, Euloma, Niobe und namentlich Ceratopyge gekennzeichnet sind. Nach letzterer Form wird der Horizont als Ceratopygekalk bezeichnet. Darauf folgt das Hauptglied des schwedischen Untersilur, der Orthocerenkalk, der außer zahlreichen Trilobiten, Gastropoden und Brachiopoden hauptsächlich große Orthoceren aus der Untergattung Endoceras enthält. Die höheren Schichten zeigen eine größere facielle Mannigfaltigkeit und sind in den verschiedenen Teilen des Landes teils als Graptolithenschiefer (unterer und mittlerer Graptolithenschiefer), teils als Kalke ausgebildet. Man unterscheidet innerhalb der kalkigen Schichtenfolge den Cystideenkalk mit Echinosphaerites aurantium, den Beyrichienkalk mit Beyrichia costata und den Chasmopskalk mit Chasmops macrourus. Die Decke des Untersilur bilden Brachiopodenschiefer und -kalke, der Leptaenakalk.

Die Hauptmasse des schwedischen Obersilur bildet der Gotländer Kalk, der etwa dem englischen Wenlock und Ludlow entspricht. Er enthält eine sehr reiche Riffkalkfauna von über tausend Arten. In Schonen wird der Gotländer Kalk wieder durch Graptolithenschiefer vertreten, den sogenannten oberen Graptolithenschiefer, der in die Rastritesschiefer, die Cyrtograptusschiefer und die Schiefer mit Monograptus colonus eingeteilt wird. Den Schluß des Obersilur bilden hier Mergel mit Kalklinsen und sandigen Einlagerungen, die in flacherem Meere entstanden sind und neben einer sonstigen, sehr reichen Fauna besonders die Gigantostraken (Eurypterus u. a.) der englischen Passage beds enthalten. Das Silur von Bornholm entspricht dem von Schonen vollständig, nur fehlen hier diese obersten merglig-sandigen Schichten.

In Norwegen ist das Silur vorwiegend schieferig und äußerst fossilarm entwickelt. Nach Osten hin schalten sich den Schiefern Kalke ein und Versteinerungen werden reichlicher. Die Schichten sind stark gestört

und teilweise metamorphosiert, so daß zuweilen völlig kristalline Schiefer entstanden sind (Trilobitenführende Glimmerschiefer von Bergen).

3. Baltikum. In den baltischen Provinzen Rußlands nimmt das Silur den Küstenstreifen am Südrand des finnischen Meerbusens und die vorgelagerten Inseln (Oesel u. a.) ein. Nach Osten erstreckt es sich bis zum Ladogasee. Zu unterst liegen die Grünsande, tonige Sande mit Glaukonitkörnern, die dem Ceratopygekalk Skandinaviens entsprechen. Sie enthalten Anelidenkiefer (Conodonten) und Fischzähnchen, die ältesten bekannten Wirbeltierreste. Darüber folgt ein lockerer Kalk mit Glaukonitkörnern. der Glaukonitkalk. der paläontologisch und stratigraphisch mit dem über ihm liegenden Vaginatenkalk eng verbunden ist. Der Vaginatenkalk ist ein wenig mächtiger grauer Kalkstein. Er entspricht petrographisch und paläontologisch durchaus dem Orthocerenkalk Schwedens. Dasselbe gilt für den darüber folgenden Echinosphaeritenkalk, während die zahlreichen, mit Lokalnamen belegten Schichten des höheren Untersilur (Schichten von Itfer, Kuckers, Jewe, Wesenberg, Lyckholm und Borkholm) nur ganz allgemein mit den gleichalterigen Schichten Englands und Skandinaviens verglichen werden können. Das Obersilur beginnt mit der Zone der glatten Pentameren (Schichten des Pentamerus borealis und P. esthonus). Diese, sowie die das Obersilur abschließenden Oeselschichten sind durchweg kalkig oder dolomitisch entwickelt. In der oberen Oeselgruppe treten wieder, wie in England und Schonen, die Eurypteriden auf.

Das baltische und skandinavische Silur besitzt für Deutschland eine besondere Bedeutung, da seine Gesteine in zahllosen Diluvialgeschieben über die norddeutsche Tiefebene verstreut sind.

Das Silur im Dnjestrgebiet und in Galizien schließt sich eng an die nordeuropäische Entwickelung an.

Im Dnjestrgebiet ist nur Obersilur entwickelt, das im wesentlichen dem Gotländer Kalk entspricht. In Galizien treten außerdem noch untersilurische Schichten auf, während das Obersilur vorwiegend als Graptolithenschiefer ausgebildet ist.

4. Belgien. Am Nordabhang der Ardennen sind bisher von silurischen Schichten nur die Dictyonemaschiefer bekannt geworden. Dagegen sind im Gebiet der großen belgischen Ueberschiebung, in der „Crète du Condroz“ sowohl Unter- wie Obersilur gut entwickelt. Faunistisch schließt sich dieses belgische und das angrenzende nordfranzösische Silur eng an die englische Entwickelung an; offenbar hängt dasselbe, wenn auch unter jüngerer Bedeckung verhüllt, über den Kanal hinweg, mit dem englischen Silur zusammen.

5. Nordamerika. Silurische Ablagerungen bedecken gewaltige Flächenräume des nordamerikanischen Kontinents. Infolge zahlreicher Bodenbewegungen, besonders im Untersilur (Ordovicium), ist die Formation sehr mannigfaltig entwickelt. Ein ausgesprochener Gegensatz macht sich zwischen der Ausbildung im Osten und der im Westen geltend.

Im atlantischen Gebiete, im Staate New York und weiter südlich liegt das Silur noch auf weite Erstreckung fast wagerecht, ähnlich wie in Schonen. Die Schichtenfolge beginnt hier mit dem sehr versteinerungsreichen Beekmantownkalk, der auch im Zentrum der Vereinigten Staaten weit verbreitet ist. Nach Ablagerung dieses Kalkes traten Bodenbewegungen ein, die zwischen dem atlantischen Küstengebiet und den westlicheren Teilen trennende Landbarren entstehen ließen. Oestlich dieser Bodenschwelle bildeten sich Graptolithenschiefer und -kalke aus, während im Westen der Appalachen weitere Kalkablagerungen stattfanden, der Chazykalk, die Cephalopoden führenden Birdseye- und Black River-Kalke und der äußerst versteinerungsreiche Trentonkalk. Eine Schieferfolge (Utikaschiefer u. a. m.) schließt das Untersilur ab.

Das Obersilur beginnt mit einem Transgressionskonglomerat, dem Oneidakonglomerat, auf das weiter sandige Schichten, die Medinasandsteine, folgen. Ein zeitliches Aequivalent dieser Schichten ist das Clinton, das sich durch das Auftreten großer glatter Pentamerusarten als gleichalterig mit dem englischen Llandovery erweist. Ebenso stellt der Niagarakalk eine Vertretung des Gotländer Kalkes, der Waterlime (Wasserkalk) eine solche der englischen Passage beds dar. Das höchste Schichtenglied des Obersilur ist der Manliuskalk.

Im pazifischen Gebiete enthält der Kalk von Pogonip die Euloma-Niobe-Fauna des tiefen nordeuropäischen Silur. Die darauf folgenden Eurekaquarzite und -Kalke entsprechen den Beekmantown- und Chazykalken des atlantischen Gebietes. Das höhere Untersilur, sowie das ganze Obersilur scheint hier jedoch zu fehlen.

In Britisch-Columbia und in Alaska ist Untersilur als Graptolithenschiefer entwickelt. Auch in Arkansas sind außer Quarziten Graptolithenschiefer des Untersilur nachgewiesen.

Untersilur kennt man jetzt auch aus dem Felsengebirge, wo es in den Staaten Montana, Wyoming, Süd-Dakota und im Koloradogebiet auftritt.

Im Mississippigebiet ist das ganze Untersilur kalkig entwickelt, während das Obersilur im größten Teile des Gebietes vollständig fehlt.

In Kanada und den arktischen Gebieten Nordamerikas sind reiche untersilurische Ablagerungen bekannt. Ebenso ist das Auftreten von Untersilur an der Westküste von Grönland durch Fossilfunde gesichert.

6. Asien. In Sibirien sind Unter- und Obersilur weit verbreitet, besonders im Gebiet der Lena und ihrer Nebenflüsse, sowie auf den neusibirischen Inseln. Am Angara liegt das Silur noch ungestört und enthält mächtige Lager von Eruptivgesteinen.

Aus China ist Untersilur in großer Ausdehnung, Obersilur dagegen nur aus dem Süden des Landes bekannt.

Ferner ist Silur aus Turkestan, dem Himalaya und aus Birma beschrieben worden. Im wesentlichen besteht das ostasiatische Silur aus Ablagerungen einer Flachsee.

7. Australien und Südamerika. Untersilur ist an der Ostküste Australiens, auf Tasmanien und Neuseeland als Graptolithenschiefer vertreten, in denen sich mehrere der nordeuropäischen Graptolithenschieferzonen nachweisen lassen. Das Obersilur besteht aus Kalken und Sandsteinen, die ebenfalls zahlreiche Versteinerungen des europäischen Silur enthalten.

In Südamerika ist Untersilur aus den Anden, Argentinien, Bolivien und Peru bekannt geworden. Außer Kalken sind namentlich Graptolithenschiefer entwickelt. Obersilur ist bisher nur aus Brasilien bekannt, gleichfalls in der Ausbildung als Graptolithenschiefer.

Aus Afrika ist erst neuerdings Silur bekannt geworden und zwar nur Obersilur (Graptolithen) im Norden der Sahara.

5b) Die mediterrane Entwickelungsform. Für die Kenntnis dieser mehr lokalen Charakter tragenden Facies hat kein anderes Gebiet eine ähnliche Bedeutung, wie

Böhmen. Durch die langjährigen Forschungen von J. Barrande ist das überaus versteinerungsreiche Silur Böhmens faunistisch und stratigraphisch sehr genau bekannt geworden. Barrande bezeichnete das Untersilur mit dem Buchstaben D, das Obersilur mit E, und gliederte D in 5, E in 2 Unterstufen. Heute werden diese Unterstufen außerdem meist noch mit Lokalnamen bezeichnet.

Das Untersilur ist vorwiegend sandig-schiefrig entwickelt und beginnt transgredierend über der oberkambrischen Lücke. Zahlreiche Diabase und ihre Tuffe sind den Schichten eingelagert. Die ältesten konglomeratisch-sandigen Schichten (D_1) enthalten nur hornschalige Brachiopoden der Gattungen Lingula, Discina und Obolus. Dann folgen Diabase und oolithische Eisenerze, die dem englischen Arenig entsprechen. Die nächst höheren, zahlreiche Trilobiten (Illaenus, Asaphus, Dalmanites, Trinucleus) einschließenden Quarzite (D_2) sind dem englischen Llandeilo gleichzustellen. Dem Caradoc entsprechen die Schiefer und Quarzite (D_3 bis D_5) mit Trinucleus concentricus und Trinucleus seticornis.

Das Obersilur ist eine wesentlich schiefrig-kalkige Schichtenfolge. Der Uebergang der sandigen Untersilurschichten in die Graptolithenschiefer des unteren Obersilur vollzieht sich ganz allmählich. Diese Graptolithenschiefer enthalten an ihrer Basis Intrusivlager von Diabas. Höher aufwärts stellen sich Kalkknollen in den Schiefern ein mit Orthoceren und anderen Cephalopoden. Darüber liegt eine Crinoidenkalkbank mit Scyphocrinus. Diese als E_1 bezeichneten Schichten entsprechen dem englischen Obersilur etwa bis in die Mitte der Ludlowschichten hinauf. Darüber liegen die Kalke der Stufe E_2, die dem höheren Obersilur Englands (Oberludlow und Downtonian) gleichzustellen sind. Der Reichtum an Versteinerungen in diesen Schichten ist ungeheuer groß. Ein berühmter Fundpunkt ist der Berg Dlouha hora bei Königshof.

Neuerdings wird auch ein Teil der mit F_1 bezeichneten Schichten, die früher als Basis des Devons betrachtet wurden, wieder zum Obersilur gezogen. Es sind dunkle plattige Kalke und Schiefer mit einer hochpelagischen, namentlich viele Zweischaler enthaltenden Fauna. Stellenweise sind diese Schichten noch reich an Graptolithen und erweisen sich dadurch als silurisch.

Fichtelgebirge und Ostthüringen. Hier ist das Silur sehr ähnlich dem böhmischen ausgebildet. Es beginnt mit sehr mächtigen Tonschiefern, die stellenweise als Dachschiefer Verwendung finden. Für den stratigraphischen Vergleich sind die Schiefer von Leimitz bei Hof wichtig, die nordische Trilobiten (Euloma, Niobe) enthalten. Sie werden von einer Zone oolithischer Eisensteine überlagert, die jedoch nicht durchgängig entwickelt ist, der sogenannten Thuringitzone. Das höhere Untersilur bilden wieder Dachschiefer und Griffelschiefer, über denen die Lederschiefer liegen, eine mächtige Folge fossilleerer, gelblich verwitternder Tonschiefer.

Das Obersilur beginnt mit dem unteren Graptolithenschiefer, Alaun- und Kieselschiefern, die die Graptolithenfauna der entsprechenden englischen Stufe (Tarannon) führen. Sie werden durch den Ockerkalk, einen hellfarbigen Kalk mit Ockereinschlüssen und dem Leitfossil Cardiola interrupta von

den oberen Graptolithenschiefern getrennt. Diese sind wieder als stark bituminöse Alaun- und Kieselschiefer ausgebildet.

Harz. Hier tritt das Silur gegen die Verbreitung des Devon sehr zurück. Graptolithenschiefer, die den oberen Graptolithenschiefern Thüringens entsprechen, sind seit langer Zeit aus der Gegend von Lauterberg und Hasselfelde bekannt. Neuerdings werden auch die Quarzite des Acker- und Bruchberges, die pflanzenführenden Plattenschiefer vom Mägdesprung und die Arkosegrauwacken von Tanne als Silur aufgefaßt. Ebenso werden die Quarzite, die südöstlich von Magdeburg aus dem Diluvium in der Elbniederung bei Gommern hervortauchen und denen vom Acker- und Bruchberg vollständig entsprechen, gleichfalls zum Silur gestellt.

Rheinisches Schiefergebirge. Erst in den letzten Jahrzehnten sind auch am Ostrande des rheinischen Schiefergebirges und zwar besonders im Kellerwald Silurschichten nachgewiesen worden, die durchaus denen des Harzes gleichen. Wie dort handelt es sich um fossilleere Quarzite (Wüstegartenquarzit), Plattenschiefer, feldspatführende Grauwacken und Graptolithenschiefer. Kalke sind sehr selten und meist versteinerungsleer, jedoch treten in einem solchen Kalk zusammen mit Trilobiten und Tentaculiten die ältesten bekannten Goniatiten auf (Agoniatites im Gilsakalk A. Denckmanns).

Die kleinen fossilarmen Vorkommen von Silur in Schlesien, der Lausitz und dem Königreich Sachsen schließen sich gleichfalls der böhmischen Ausbildung an.

Alpen. Es sind nur wenig ausgedehnte weit auseinanderliegende Vorkommen bekannt. In den karnischen Alpen erreichen die untersilurischen Schiefer von Mauthen eine Mächtigkeit bis zu 2000 m. Den Schiefern sind Grauwacken, Quarzite, Kalke und Eruptivgesteine eingelagert. Das Obersilur ist kalkig entwickelt und enthält zahlreiche Arten des böhmischen Silur. Stellenweise, wie am Findenigkofel, sind auch Riffkalke ausgebildet.

West- und Südfrankreich. In der Bretagne und Normandie beginnt das Untersilur mit dem transgredierenden armorikanischen Sandstein, einem Aequivalent des englischen Arenig. Darüber liegen die Schiefer mit Calymmene, denen die Dachschiefer von Angers eingeschaltet sind. Das höhere Untersilur ist, wenn überhaupt, vorwiegend sandig entwickelt (Sandsteine von May und Belvedere). An der Basis des Obersilur liegen gleichfalls in weiter Verbreitung Sandsteine. Darüber folgen bituminöse Graptolithenschiefer und endlich Kalkknollenschiefer mit Schalenkrebsen. In der kleinen Gebirgsinsel der Montagne noire (Languedoc) ist das ganze Silur wohl ausgebildet, während es in dem Zentralplateau fehlt. Wichtig ist hier an der Basis der Schichtenfolge das Auftreten des nordeuropäischen Euloma-Niobe-Horizontes. Darüber folgen Graptolithenschiefer und Kalkknotenschiefer, Aequivalente des englischen Arenig und Llandeilo. Auch das Obersilur ist als Graptolithenschiefer oder Kalkknotenschiefer mit Cardiola interrupta ausgebildet. Die sehr fossilreichen Kalke des oberen Obersilur entsprechen faunistisch durchaus dem böhmischen E_2.

Pyrenäen. Hier ist Untersilur in Form von Grauwacken mit Echinosphaerites und Schiefern mit Trinucleus, Obersilur als Graptolithenschiefer und bituminöser Kalk mit Cardiola interrupta entwickelt.

Auch in Spanien, Portugal und auf Sardinien tritt Silur in ähnlicher, mediterraner Entwickelungsform auf.

Auf der Balkanhalbinsel ist erst neuerdings Obersilur bekannt geworden, nachdem sich in Schiefern, die man bis dahin als karbonisch aufgefaßt hatte, einzeilige Graptolithen im Distrikt von Sofia gefunden haben.

6. Nutzbare Mineralien und Gesteine. Schiefer. Die wohlgeschichteten und stellenweise sehr dünn und ebenflächig geschieferten Graptolithenschiefer eignen sich vielfach zu Dachschiefern; so in Frankreich bei Angers, in Thüringen bei Gräfenthal und Steinach und im Vogtland bei Hirschberg. Bei Steinach werden die Schiefer auch zur Herstellung von Schreibtafeln und Griffeln verwendet.

Mit der Zunahme des die Schiefer schwarz färbenden bituminösen Materials gehen die Schiefer in sogenannte Schwärzschiefer über, die im thüringisch-vogtländischen Gebiet zur Herstellung schwarzer Farbe und Zeichenkreide ausgebeutet werden.

Die Schwefelkies enthaltenden sogenannten Alaunschiefer wurden früher vielfach zur Gewinnung von Alaun benutzt, namentlich in Schweden, aber auch bei Steben und Ludwigstadt in Thüringen.

Kalk. Bei Saalfeld in Thüringen, Hirschberg im Vogtland und an vielen anderen Stellen werden silurische Kalke als Marmor verarbeitet.

Erze. Die in Thüringen, im Vogtland und in Böhmen in untersilurischen Tonschiefern eingelagerten oolithischen Eisenerze (Thuringit, Chamosit und Roteisenerz) werden zurzeit in Thüringen nur noch bei Schmiedefeld, in Böhmen dagegen noch vielfach abgebaut.

Derartige oolithische Eisenerze treten auch im Untersilur der Bretagne und des Staates New York auf.

Wichtig sind die Lager von Spateisenstein in den silurischen Kalken Steiermarks, aus denen das bekannte steirische Eisen gewonnen wird (Erzberg bei Eisenerz, Dienten, Schwaz in den Alpen).

Im untersilurischen Dolomit der Appalachen treten zahlreiche Flöze von Brauneisenstein auf.

Ebenfalls im untersilurischen Dolomit (Trenton) setzen in Wisconsin, Illinois und Jowa reiche Bleiglanzvorkommen auf. Sie sind an die Spalten und Höhlungen des zerklüfteten Dolomits gebunden und werden von mehreren anderen Erzen (Zinkblende, Kupferkies, Galmei) begleitet.

Kohle. Sehr bemerkenswert sind die nur stellenweise verwertbaren geringmächtigen Anthrazitflöze in den Graptolithenschiefern von Südschottland, Cork in Irland und Oporto in Portugal. Entsprechend ihrer Lagerung zwischen hochmarinen Schichten können sie nur als aus zusammengehäuftem Seetang entstanden aufgefaßt werden (Algenkohle).

Salz. Steinsalz und Gips in weiter Verbreitung sind aus dem Silur von Nordamerika (New York, Pennsylvanien, Ohio, Virginia) bekannt. In Kanada (Ontario) sind bis zu 12 m mächtige Steinsalzflöze erbohrt. Der Salzgehalt vieler, besonders im Staate New York auftretender Salzquellen stammt aus dem Silur.

Literatur. **R. Murchison,** *Silurian System 1839.* — **Derselbe,** *Siluria, 1854, 5. Aufl. 1867.* — **Murchison, de Verneuil and Keyserling,** *Geology of Russia in Europe and the Ural Mountains, 1845.* — **J. Barrande,** *Système silurien du centre de la Bohème (1852 bis jetzt erschienen, 29 Bände).* — **F. Katzer,** *Geologie von Böhmen, 2. Aufl. 1902.* — **Peach and Horne,** *The Silurian rocks of Scotland, 1899.* — **Angelin,** *Palaeontologia Scandinavica, 1854.* — **Kiaer,** *Das Obersilur im Kristianiagebiet, 1908.* — **Moberg,** *Silurian of Sweden, 1910.* — **Fr. Schmidt,** *Silur-Formation von Esthland, Nord-Livland und Oesel, 1858.* — **Derselbe.** *Führer auf den Exkursionen des 7. internationalen Geologen-Kongresses in St. Petersburg, Nr. XII. 1897.* — **F. Römer,** *Lethaea erratica, 1885.* — **J. Hall,** *Palaeontology of New York, seit 1847.* — **E. Kayser,** *Geologische Formationskunde, 4. Aufl. 1911.* — **E. Haug,** *Traité de Géologie, II¹. Paris 1910.* — **Roemer-Frech,** *Lethaea geognostica, Bd. I.* — **Frech,** *Lethaea palaeozoica, 1912.*

F. Herrmann.

Sinnesorgane.

Anatomie der Sinnesorgane.

1. Einleitung: Morphologische und physiologische Einteilung der Sinnesorgane. Reizrezeption bei Protozoen. Anelektive Sinnesorgane. 2. Organe des mechanischen Sinnes: Tastorgane; Sehnen- und Muskelspindeln; Seitenorgane, Gallertröhren; Labyrinthorgan; Hörorgan der Wirbeltiere mit seinen Hilfsapparaten. Hörorgane der Insekten. Statische Organe. 3. Organe des thermischen Sinnes. 4. Organe des chemischen Sinnes. 5. Organe des optischen Sinnes, Sehorgane: Abstufung der Leistungen; Sehzellen; diffus verteilte Sehzellen; einfachste Sehorgane; Sehorgane mit intra- und subepithelialen und solche mit epithelialen Sehzellen; Erhöhung der Leistungen bei beiden Typen; Bildung der Linse und ihre Bedeutung; Akkommodation. Zusammengesetzte Augen der Arthropoden; Appositions- und Superpositionssehen; besondere Anpassungen. Die Wirbeltieraugen; Bau und Entwickelung; Akkomodation; besondere Anpassungen; Hilfsapparate. Das Parietalauge.

1. **Einleitung.** Sinnesorgane (Rezeptionsorgane, Rezeptoren) sind Teile des Nervensystems, die entweder unmittelbar oder unter Vermittelung eingeschalteter Hilfsapparate, durch bestimmte Veränderungen in der Außenwelt oder im Körper des Tieres selbst gereizt werden und die daraus entspringende Erregung fortleiten, in den meisten Fällen zum zentralen Nervensystem, in manchen Fällen aber vielleicht auch direkt zu den Ausführungsorganen.

Man kann die Rezeptionsorgane nach zwei verschiedenen Gesichtspunkten einteilen, nach ihrer anatomischen Beschaffenheit, also morphologisch, und nach ihrer Verrichtung, also physiologisch.

Morphologisch unterscheiden sich die Sinnesorgane derart, daß als reizaufnehmender Teil der Nervenzelle, des Neurons, bei den einen der Zellkörper selbst fungiert, bei den anderen die von ihm ausgehenden Faserfortsätze mit ihren Endbäumchen oder Endnetzen (Endretikolaren). Jene erste Art von Sinnesorganen, bei denen meist der Zellkörper mit Epithelzellen in einheitlichem Verbande steht und selbst an die Oberfläche des Epithels grenzt, bezeichnet man als (primäre) Sinneszellen, die letzteren als freie Nervenendigungen. Die Endbäumchen und -netze ihrerseits nehmen entweder den Reiz unmittelbar auf, z. B. die freien Nervenendigungen in der Epidermis des Menschen, oder sie treten in Beziehung zu besonderen reizaufnehmenden Zellen, den sekundären Sinneszellen; die sekundären Sinneszellen unterscheiden sich von den primären dadurch, daß sie keine Nervenfortsätze besitzen, also nicht als Abschnitte von Neuronen zu betrachten sind. Solche sekundären Sinneszellen sind z. B. die Schmeckzellen der Geschmacksknospen oder die rezipierenden Zellen des Labyrinths bei den Wirbeltieren. Sekundäre Sinneszellen sind auf den Kreis der Wirbeltiere beschränkt, bei den Wirbellosen sind sie unbekannt.

Die Scheidung von primären Sinneszellen und freien Nervenendigungen läßt sich nicht scharf durchführen. In vielen Fällen ist eine Sinneszelle mit ihrem peripheren Teile so lang ausgezogen, daß dieser faserförmig erscheint und der kern-

haltige Teil der Zelle weit proximal von der basalen Grenze des Epithels verschoben ist, in welches ihr distaler Abschnitt eintritt; solche Zellen werden in der Literatur vielfach als bipolar bezeichnet. Immerhin wird man vielleicht eine solche Zelle mit Sicherheit als epitheliale Sinneszelle bezeichnen können, so lange der distale Zellabschnitt einheitlich ist. Es treten aber auch Fälle auf, wo in einer Reihe gleichartiger Sinnesorgane alle möglichen Uebergänge von einem einheitlichen peripheren Abschnitt der Sinneszelle zur Aufsplitterung desselben in ein Endbäumchen und schließlich zum Auftreten mehrerer verästelter peripherer Zellfortsätze vorhanden sind (Fig. 1); daß diese



Fig. 1. Verschieden gestaltete Sinneszellen in den Papillen des Rüssels bei einem Ringelwurm, Glycera Goesii. Nach Retzius.

Zellfortsätze alle bis zur Oberfläche des Epithels reichen, ist das einzige, wodurch hier primäre Sinneszelle und freie Nervenendigung unterschieden sind. Für die freien Nervenendigungen aber macht es keinen grundsätzlichen Unterschied, ob der Zellkörper des betreffenden Neurons nahe der Oberfläche liegt und einen längeren proximalen Fortsatz zum Zentralorgan schickt (z. B. manche freie Nervenendigungen bei Strudelwürmern oder Arthropoden Fig. 2), oder ob er weiter proximal und schließlich im Zentralorgan selbst gelegen ist (z. B. beim Regenwurm und bei den Wirbeltieren); der betreffende Neuron bleibt doch ein rezeptorischer.

Physiologisch werden die Sinnesorgane nach ihren Leistungen eingeteilt, oder genauer nach den Reizarten, denen sie zugänglich sind. Es ist nicht unwahrscheinlich, daß Sinnesorgane vorkommen, die normalerweise verschiedenen Reizarten zugänglich sind, also etwa durch mechanische, chemische und thermische Reize erregt werden können; sie werden als anelektive Sinnesorgane bezeichnet. Ihnen steht die weitaus größte Menge der Sinnesorgane gegenüber; diese sind normalerweise nur für eine Reizart zugänglich, sie sind elektiv. Der Reiz, der sie normalerweise zu erregen vermag, heißt der ihnen ädaquate Reiz. Inadäquate Reize werden von solchen Organen gewöhnlich durch den Bau und die Anbringung der Organe abgehalten; wenn solche trotzdem Zugang finden, so wird das Organ zwar in Erregung versetzt, aber die dadurch hervorgerufene Erregung in den Zentralorganen ist von einer solchen, die durch den adäquaten Reiz verursacht ist, nicht verschieden (Lehre von den spezifischen Sinnesenergien): die elektiven Sinnesorgane hat man deshalb wohl auch als spezifische Sinnesorgane bezeichnet.

Die elektiven Rezeptionsorgane teilt man nach den Reizarten ein, in solche, die durch mechanische, thermische, chemische und optische Reize erregt werden. Die Organe des mechanischen Sinnes weisen vielerlei Modifikationen auf, die zur Unterscheidung einer Anzahl besonderer Organe geführt haben: solche, die auf äußeren Druck oder Berührung reagieren (Tastorgane, Tangorezeptoren), solche, die durch den stets senkrecht nach unten wirkenden Druck eines auf Sinneshaare drückenden schweren Körperchens, eines Statolithen, erregt werden (Statolithenorgane oder statische Organe), und schließlich solche, die nur durch Wellenbewegungen von bestimmter Frequenz erregt werden (Hörorgane). Damit sind wahrscheinlich noch nicht alle Modifikationen erschöpft; zu den Organen des mechanischen Sinnes gehören auch die Wollustorgane, die rezipierenden Organe der Blutdruckregulation, die rezeptorischen Nervenendigungen an Muskeln und Sehnen, und wohl auch die Schmerzorgane. Ebenso sind die Organe des chemischen Sinnes bei vielen Lufttieren nach zwei verschiedenen Richtungen ausgebildet. Für die einen besteht der adäquate Reiz in flüssigen chemischen Stoffen: es sind Schmeckorgane (Gustorezeptoren); die anderen, die Riechorgane (Stiborezeptoren), sind normalerweise nur gasförmigen Reizstoffen zugänglich. Diese Sonderung scheint jedoch bei Wassertieren und niederen Lufttieren (z. B. Regenwurm) nicht vorhanden zu sein.

Die Grundlage für die Beurteilung der Sinnesorgane nach ihren Leistungen bildet die Selbstbeobachtung des Menschen. Aber auch diese muß mit viel Kritik geübt werden, und die hergebrachte Einteilung der fünf Sinne: Gefühl, Gehör, Geschmack, Geruch, Gesicht, ist durchaus unrationell und lückenhaft. Denn auch beim Menschen entziehen sich manche Sinnesorgane, deren Vorhandensein durch die anatomische Untersuchung bekannt ist, der Selbstbeobachtung, weil sich ihre Funktionen unter der Schwelle des Bewußtseins abspielen, so die statischen Organe, oder die Blutdruckrezeptoren, oder die rezeptorischen Organe der Muskeln und Sehnen. Für die Bewertung der Sinnesorgane der Tiere, vor allem derjenigen der tiefer stehenden Formen, deren Organisation von der des Menschen stark abweicht, kommt neben allgemeineren Ueberlegungen, die sich auf Bau, Lage und Anordnung

des Organs beziehen, hauptsächlich das Experiment in Betracht. Es ist aber durchaus noch nicht überall entschieden, welche Verrichtung einem Sinnesorgan zukommt. Trotz dieser Unsicherheit ist für die Behandlung der Sinnesorgane die physiologische Einteilung die gebotene; die morphologische Einteilung leistet uns gute Dienste für die Beschreibung der Sinnesorgane, indem sie gestattet, deren Grundeigentümlichkeiten von vorn herein kurz zu kennzeichnen.

Inkonsequent und für die vergleichende Betrachtung durch die ganze Tierreihe hindurch unbrauchbar ist die Zusammenfassung Hautsinnesorgane, denen Gegenbaur die Geschmacksorgane angliedert, aber die Hörorgane, Sehorgane und Riechorgane gegenüberstellt. Die diffuse Verbreitung der Sehorgane bei manchen Würmern, die nahe Verwandtschaft von Riech- und Schmeckorganen bei luftlebenden Arthropoden vertragen sich mit einer solchen Einteilung nicht. In erster Linie ist ja die überwiegende Mehrzahl der Sinnesorgane von der Epidermis abzuleiten, hätte also Anspruch auf die Bezeichnung Hautsinnesorgan.

Ehe wir zur Besprechung der einzelnen Sinnesorgane übergehen, sei kurz der Reizbeantwortung bei den Protozoen und ihrer besonderen Grundlagen gedacht. Reizbarkeit als allgemeine Eigenschaft des Protoplasmas macht eine Protozoenzelle zugleich zur Sinneszelle. Eine Amöbe kann dann als Beispiel anelektiver Reaktionsweise dienen; sie ist durch verschiedene Reize, mechanische, chemische, thermische, optische, erregbar. Aber es sind keine besonderen Organe für die Reizaufnahme vorhanden; das ganze Exoplasma nimmt den einen wie den anderen Reiz auf, und die Reaktion ist stets die gleiche: bei bestimmter Reizstärke erfolgt Einziehen der Pseudopodien und Abkugelung des Körpers. Bei den Wimperinfusorien werden nach Jennings die chemischen und thermischen Reize am schnellsten und stärksten von dem nackten Protoplasma der Mundbucht rezipiert; doch glaubt man bei manchen noch besondere Aufnahmestellen für bestimmte Reize annehmen zu dürfen: so werden die starren Borsten auf der Rückenseite der hypotrischen Infusorien oder papillenartigen Erhebungen am Rande von Loxophyllum als Tastorgane angesehen. Bei vielen Flagellaten befindet sich nahe dem Vorderende ein roter Fleck, das „Stigma“; das farblose Protoplasma vor demselben ist nach Engelmann stark durch Licht reizbar, während der übrige Körper eine solche Reizbarkeit nicht besitzt. Es wird daher in dem Stigma mit dem ihm vorgelagerten Protoplasma ein optisches Sinnesorgan vermutet, und die bei manchen Arten vor dem Stigma gelegenen Stärkekörner sind als lichtsammelnde Organe gedeutet worden.

Anelektive Sinnesorgane sind bei vielzelligen Tieren nur vermutungsweise bekannt. Die Haarzellen, die auf der Haut der Mollusken diffus verbreitet sind, werden von manchen Untersuchern als anelektiv angesehen, doch ist es zweifelhaft ob mit Recht. Eher dürften die Sinnesorgane an den Pedicellarien der Seeigel nach den Versuchen v. Uexkülls anelektive Rezeptoren vorstellen, vielleicht auch das Cnidocil der Nesselzellen bei den Cnidariern.

2. Organe des mechanischen Sinnes. Unter den elektiven Rezeptionsorganen betrachten wir zuerst die Organe des mechanischen Sinnes und zwar zunächst diejenigen, welche durch Druck erregt werden, die Tastorgane (Tangorezeptoren). Sie sind bei den wirbellosen Tieren in einer gewissen Gleichmäßigkeit ausgebildet. Sie treten hier in zwei Formen auf: am weitesten verbreitet sind die freien Nervenendigungen, die zwischen den Zellen des Körperepithels liegen, und deren Zellkörper sich zum Teil nahe unter dem Epithel finden, zum Teil aber auch in größerer Tiefe und selbst im Zentralorgan liegen. Beides kann beim gleichen Tier nebeneinander vorkommen. So liegen bei den Strudelwürmern einige der Zellkörper oberflächlich, andere in dem äußeren Nervenplexus, und bei den Regenwürmern finden sich manche Zellkörper im Verlauf der peripheren Nerven, die meisten aber im Bauchmark. Von besonderem Interesse sind die freien Nervenendigungen zwischen den Zellen der Borstentasche bei den polychäten Ringelwürmern; die Borste ist hier als Druckvermittler in den Dienst des Sinnesorgans getreten, und dadurch wird ein Ferntasten ermöglicht, ähnlich wie bei den Tastborsten der Arthropoden und den Tasthaaren der Säuger. Die zweite Form von Tastorganen sind primäre Sinneszellen, welche eine oder mehrere starre unbewegliche Wimperhaare tragen; sie kommen vor bei Strudelwürmern (Planarien), in den sogenannten Seitenorganen vieler Meeresanneliden (Capitelliden, Opheliaceen, Amphicteniden) und auf den Kiemen der Muscheln.

Mannigfacher in der äußeren Ausbildung, aber in der Grundform nicht abweichend, sind die Tastorgane bei den Arthropoden. Wo der Körper der Arthropoden von einem starren Chitinpanzer umgeben ist, da können freie Nervenendigungen nicht zur Reizaufnahme dienen; wohl aber finden sie sich an Stellen wo die Cuticula dünnhäutig ist, also bei hartgepanzerten Formen an den dünnen Gelenkhäuten, welche die einzelnen Ringe des Panzers verbinden (Fig. 2), bei weichhäutigen Formen wie Raupen und Larven der Bockkäfer und des Maikäfers über die ganze Oberfläche verbreitet. Die häufigsten Tastorgane der Arthropoden sind jedoch die Tastborsten, hohle lange Chitin-

kegel, die mittels einer dünneren Chitinstrecke beweglich am Panzer angebracht sind. Nach neueren Untersuchungen endigt an solchen Borsten bei den Libellenlarven



Fig. 2. Sinneszelle, deren Endbäumchen in der Epidermis frei endigen. Von einer Libellenlarve. Nach Zawarzin.

eine Sinneszelle mit schwacher, knöpfchenartiger Endanschwellung ihres dünnen peripheren Abschnittes, und zwar liegt diese Endigung an der Stelle, wo die Borste beweglich eingelenkt ist (Fig. 3). Es ist

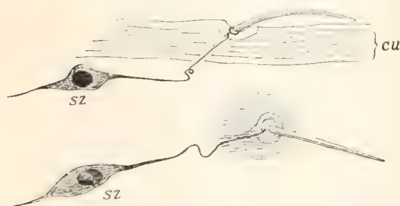


Fig. 3. Tasthaare von der Antenne einer Libellenlarve. Von der Seite und von oben. sz Sinneszelle, cu Cuticula. Nach Zawarzin.

dann leicht zu verstehen, wie eine Lageveränderung der Borste oder ein Druck auf dieselbe einen Reiz auf das Nervenende ausüben kann. Ob in der Tat in anderen Fällen der Zellfortsatz tief in die Borste tritt, wie es von früheren Untersuchern meist dargestellt wurde, bedarf erneuter Untersuchung; denn bei solchem Verhalten würde eine Reizung des Nerven bei Druck auf die Borste viel schwerer zu erklären sein. Teilweise liegen die Zellkörper der die Borsten versorgenden Neurone diesen nahe, teilweise weit von ihnen entfernt (Fig. 4, A und B). Wo das erstere der Fall ist, da erhalten die Tastborsten Aehnlichkeit mit den borsten- oder schlank kegelförmigen Organen des chemischen Sinnes, die stets von primären Sinneszellen versorgt sind und an ihrem Ende entweder eine Oeffnung oder doch nur einen ganz dünnen Chitinüberzug besitzen (vgl. unten Fig. 38). Die Borsten können in ihrer Form von der einfachen Zylindergestalt abweichen, und im Zusammenhang damit ändert sich auch ihre Funktionsweise. Häufig wird z. B. die Oberfläche der Borsten durch Fiederung mehr oder weniger vergrößert (Fig. 4, B); dadurch wird eine feinere Reaktion auf schwache Bewegungen des umgebenden Mediums, sei es Wasser oder Luft, ermöglicht, im höchsten Maße dann, wenn sich benachbarte Härchen durch die Fiedern zu einem zusammenwirkenden Ganzen vereinigen; solche Härchen, die ihre verbreiterte Fläche nach verschiedenen Richtungen kehren, werden durch verschieden gerichtete Wasserbewegungen maximal erregt, ermöglichen also eine „Unterscheidung" der Richtung von solchen.

Die Sinnesschuppen auf den Schmetterlingsflügeln und die Sinneskuppeln ebendort und auf den Schwingkölbchen der Fliegen sind wohl sicher als Organe des mechanischen Sinnes zu betrachten. Sie weichen aber vom Bau der übrigen Tastborsten durch die Art und Weise ihrer Innervierung ab; die zugehörige Sinneszelle endigt mit einem Stiftkörperchen (Fig. 5), wie es den Zellen der sicher als Hörorgane zu deutenden Tympanal- und Chordotonalorgane der Insekten zukommt (Fig. 20). Daß sie, entsprechend ihrer Lage, zur Wahrnehmung der Windrichtung und des Luftwiderstandes

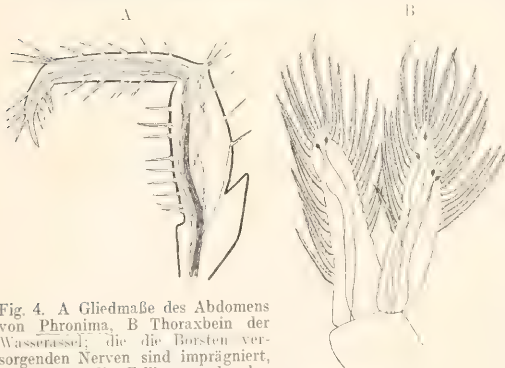


Fig. 4. A Gliedmaße des Abdomens von Phronima, B Thoraxbein der Wasserassel; die die Borsten versorgenden Nerven sind imprägniert, in B sind die Zellkörper der betreffenden Neurone sichtbar. Nach vom Rath.

oder dergleichen dienen, wie ja die verwandten Chordotonalorgane ebenfalls auf Luftschwingungen reagieren, ist eine zwar wahrscheinliche, aber doch noch genauer zu begründende Vermutung. Es ist wahrscheinlich, daß ähnliche Organe mit Stiftchenkörperchen noch bei vielen Insekten vorkommen; denn bei dem spezialisierteren Bau

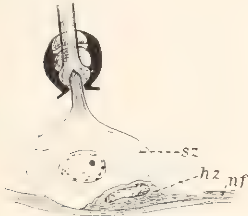


Fig. 5. Sinneszelle (sz) einer Sinnesschuppe vom Flügelrande eines Schmetterlings (Chimabacche). nf Nervenfortsatz, hz Hüllzelle. Nach Vogel.

der Chordotonal- und Tympanalorgane muß man annehmen, daß sie sich von solchen Sinneskuppeln oder ähnlichen Bildungen herleiten und nicht umgekehrt.

Die Tastorgane bei den Wirbeltieren sind ungemein mannigfaltig. Sie sind am besten bei den Säugern untersucht, und dort wohl auch am reichlichsten vorhanden. Primäre Sinneszellen sind hier nirgends als Tastorgane vorhanden; freie Nervenendigungen dagegen und sekundäre Sinneszellen finden sich in sehr vielen Modifikationen. Es lassen sich zwei Haupttypen unterscheiden: Nervenverästelungen wie sie bei den Wirbellosen vorkommen, zwischen den Zellen der Epidermis, intraepithelial endigend, und andererseits terminale Netze und Endretikolaren, d. h. gröbere Netze und Neurofibrillennetze. Während die intraepithelialen Nervenverästelungen in ihrem Bau ziemlich einförmig sind, kommen die Endnetze und Endretikolaren in verschiedener Art vor: die gröberen Netze sind flächenhaft oder in verschiedener Weise aufgeknäuelt und enthalten oft eingeschaltet Neurofibrillennetze; die letzteren treten als knopf-, blatt- oder scheibenförmige Verbreiterungen der Nervenfasern (Fig. 7, B) auf und liegen zuweilen intraepithelial viel häufiger aber subepithelial und auch ferner von der Epidermis, im Bindegewebe der Bauchwand und der Gelenke, in der Knochenhaut u. a. a. O.



Fig. 6. Kugeliger Endkolben aus der Brustflosse eines Haies (Scyllium). nf Nervenfaser. Nach Wunderer.

Häufig bilden die Endnetze und Endretikolaren Teile zusammengesetzter Apparate, in die sie in verschiedener Weise eingehen. Am einfachsten gebaut sind die von einer bindegewebigen Hülle umgebenen, meist aufgeknäuelten Endnetze, wie sie schon bei Anamniern (Fig. 6) vorkommen und bei Säugern als Meißnersche Fettkörperchen (Fig. 7) und Krausesche Endkolben häufig sind. Besonders auffällig sind die bindegewebigen Kapselbildungen bei den Lamellenkörperchen, zu denen von den Krauseschen Endkolben eine ganze Reihe von Uebergängen führt. Bei ihnen wird ein Kolben, der eine zentrale Nervenfaser einschließt, von einem Endnetz umsponnen, das von einer zweiten Nervenfaser ausgeht; nach außen von diesem Endnetz wird der Kolben von regelmäßigen bindegewebigen Lamellen eingehüllt, die durch lymphgefüllte Zwischenräume getrennt sind (Fig. 8 bis 10); die zentrale Nervenfaser des Kolbens endigt mit einer oder zuweilen mit mehreren knöpfchenartigen Anschwellungen, die wohl als Endretikolaren zu betrachten



Fig. 7. A Typisches Meißnersches Tastkörperchen und B Tastkörperchen mit blattförmigen Endretikolaren aus der Haut des Menschen. Nach Dogiel.

sind. Solche Lamellenkörperchen sind die Vater-Pacinischen Körperchen der Säuger (Fig. 8 und 9) und die Herbstschen Körper-

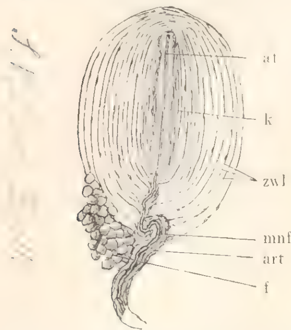


Fig. 8. Vater-Pacinisches Körperchen aus dem Mesenterium der Katze. af Achsenfaser, art Arterie, f Fett, k Innenkolben, mnf markhaltige Nervenfaser, zwl mit Flüssigkeit gefüllte Räume zwischen den Lamellen. Aus Stoehr.



Fig. 9. Modifiziertes Vater-Pacinisches Körperchen aus der Harnblase des Pferdes. nf Nervenfasern; die Verzweigungen der dünnen, marklosen Nervenfaser sind nicht sichtbar. Nach S. Michailow.

chen der Vögel (Fig. 10); bei jenen besteht der Kolben ebenfalls aus hüllenartigen Lamellen, während er sich bei den Herbstschen Körperchen aus zwei Zellreihen aufbaut.

Eine dritte Gruppe bilden die Endretikolaren in Verbindung mit sekundären Sinneszellen. Die einfachsten Bildungen dieser Art sind wohl die Merkelschen Tastzellen der Säuger; im basalen Teile des Epithels gelegen, bestehen sie aus einer großkernigen, etwa ovalen Zelle, der sich von einer Seite her eine plattenförmige Ausbreitung des Nerven, eine Fettscheibe, dicht anlegt; sie ist als ein Neurofibrillennetz (Endretikolare) aufzufassen.

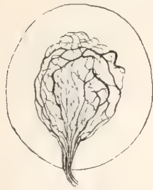


Fig. 10. Herbstsches Körperchen aus der Schnabelhaut der Ente. nf_1 dicke, bis zum Innenkolben markhaltige Nervenfaser, die in der Achse des Kolbens verläuft, nf_2 dünne marklose Nervenfaser, die den Kolben umspinnt. Nach Dogiel.

Ebenso sind in der Maulwurfschnauze Tastapparate vorhanden, bei denen knopfförmige Nervenendigungen in Epithelzellen eintreten, und zwar mehrere in eine Zelle; die Zellen liegen übereinander geschichtet zu einer säulenförmigen Differenzierung im Epithel; in der Mitte jeder Säule verläuft eine zentrale und an ihrer Oberfläche 20 bis 40 Nervenfasern in axialer Richtung, und von Stelle zu Stelle geben alle diese ein, häufig gestieltes, Endknöpfchen an die Zellen der Säule ab; diese treten in die Zelle ein, deren Kern an der Stelle oft eine mehr oder weniger tiefe Einbuchtung zeigt. Solcher Zellsäulen, unter denen die Epidermis polsterartig gegen die Lederhaut vorspringt, sind in der Maulwurfschnauze gegen 5000 vorhanden; zwischen ihnen verlaufen noch unregelmäßig ähnliche Nervenfasern im Epithel, unter den Säulen liegen jedesmal etwa 5 Merkelsche Tastzellen und in der Lederhaut je 1 bis 2 Vatersche Körperchen. Im ganzen sind also in der Maulwurfschnauze über 150000 intraepitheliale Nervenfasern, gegen 25000 Merkelsche Tastzellen und 7500 Vatersche Körperchen vereinigt, so daß ein Organ von ungeheurem Nervenreichtum vorliegt.

Gebilde, die in mancher Beziehung an die Merkelschen Tastzellen erinnern, sind die Grandryschen Tastkörperchen der Vögel. Auch bei ihnen sind plattenförmige Endausbreitungen der Nervenfasern (Tastscheiben) mit sekundären Sinneszellen vereinigt, aber sie liegen zwischen je zwei Zellen, so daß ein solches Tastkörperchen aus mindestens 2, oft noch mehr (bis 5) aufeinander geschichteten Zellen besteht, die jedesmal durch eine Tastscheibe getrennt sind. Die Tastscheiben werden durch ein Netz von Neurofibrillen gebildet (Fig. 11). Das ganze Grandrysche Körperchen ist noch durch ein Endnetz von Nervenfäserchen

außen umsponnen, die von einer zweiten Nervenfaser stammen. Im Unterschied von den **Merkelschen** Tastzellen liegen die **Grandryschen** Körperchen stets unter der Epidermis, in der Lederhaut. Sie finden sich besonders zahlreich im Schnabel vieler Vögel, vor allem an der Schnabelspitze der Enten und Schnepfen und in der Zungenspitze der Spechte. Nahe verwandt mit ihnen scheinen die Tastkörperchen der Reptilienhaut zu sein. Man hat bisher vergeblich versucht, für die Fülle der Endapparate, die vor allem in der Haut der Säuger nebeneinanderliegen, genaueren Anhalt über die Besonderheiten ihrer Funktion zu bekommen. Im Balg und in der Wurzelscheide der Tasthaare findet sich eine verblüffende Mannigfaltigkeit von Formen der Nervenendigungen, besonders von Endretikolaren, teils frei, teils in Verbindung mit sekundären Sinneszellen (**Merkelsche** Tastzellen), und doch können für sie kaum andere als Druckreize in Betracht kommen. Die freien intraepithelialen Nervenendigungen sind für Organe des Schmerzsinns erklärt worden, weil beim Menschen in der Mitte der Hornhaut des Auges, wo nur sie vorkommen, die Reize nur mit Schmerzempfindung beantwortet werden. Die **Merkelschen** Zellen und die Organe der Maulwurfschnauze hält man wohl mit Recht für Organe der Druckrezeption; dasselbe dürfte für die **Grandryschen** Körperchen der Vögel gelten. Die Lamellenkörperchen der Vögel, die **Herbstschen** Körperchen, kommen an der Wurzel der Tastfedern bei der Eule, im Schnepfenschnabel und in der Entenzunge so zahlreich vor, daß man auch in ihnen Tastorgane sehen muß, die auf Druck reagieren. Den **Vater-Pacinischen** Körperchen der Säuger hat man früher die gleiche Funktion zugesprochen, und **Dogiel** hält auch jetzt noch daran fest. Neuere Untersuchungen aber lassen für diese Körperchen eine solche Funktion unsicher erscheinen; **Lennander** und **Ramström** fanden an den Stellen, wo in der vorderen Bauchwand des Menschen **Vater-Pacini**sche Körperchen in Menge im Peritoneum vorkommen, keine Reaktion auf Berührung und Druck, wenn sie mit einer Sonde die Bauchwand innen abtasteten. Entsprechend ihrer gehäuften Lage an arterio-venösen Anastomosen und in der Adventitia der Aorta, und wegen des Eindringens von Blutgefäßen zwischen die Lamellen dieser Körperchen wird ihnen jetzt von manchen Seiten eine Bedeutung für die Blutdruckregulation zugeschrieben.


Fig. 11. Tastscheibe aus dem **Grandry**schen Körperchen eines Vogels. Nach **Dogiel**.

An den Sehnen und Muskeln der Wirbeltiere finden sich freie Nervenendigungen sensorischer Natur in Gestalt der sogenannten Sehnenspindeln und Muskelspindeln. Sehnenspindeln (Fig. 12; bei Vögeln und Säugern nachgewiesen) sind spindelförmig angeschwollene Abschnitte von Sehnenbündeln am Uebergange der Sehne zum Muskel, an deren Mitte eine Nervenfaser herantritt; diese spaltet sich unter der bindegewebigen Hülle der Spindel zu einem dichten Astwerk mit kolbenförmigen freien Enden auf. Aehnlich stellen die Muskelspindeln (bei Amphibien, Reptilien und Säugern nachgewiesen) gesonderte Gruppen feiner, kernreicher Muskelfasern dar, unter deren Bindegewebshülle sich die herantretenden Nervenfasern zu rosettenartig angeordneten freien Enden verästeln. Während die Sehnenspindeln bei steigender Dehnung der Sehnen stärker gereizt werden sollen, reagieren die Muskelspindeln auf den Druck, der von den benachbarten Muskelfasern bei der Kontraktion auf sie ausgeübt wird.

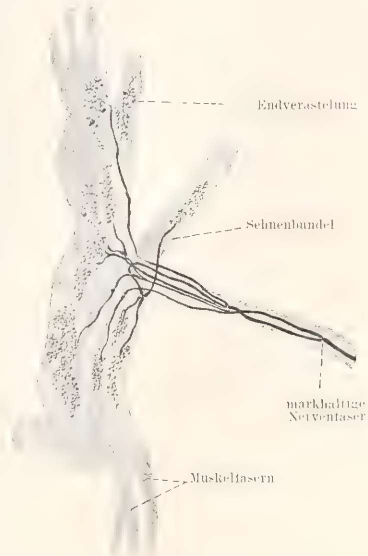


Fig. 12. Sehnenspindel einer Katze. Aus **Stoehr**.

Eine besondere Gruppe unter den Organen des mechanischen Sinnes bei den Wirbeltieren bilden diejenigen, deren rezipierende Endapparate sekundäre Sinneszellen mit starren Härchen, Borsten oder Stiften sind, die an der Oberfläche des Epithels stehen und vom 7. und 8. Gehirnnerven, dem Acustico-Facialis versorgt werden. Das sind die sogenannten Seitenorgane (Seitenlinie, Schleimkanäle) und ihre Fortsetzungen am Kopf bei den Fischen und die entsprechenden Organe bei den wasserbewohnenden Amphibien, ferner die Gallertröhren oder Lorenzinischen Ampullen der Selachier und schließlich das allen Wirbeltieren gemeinsame Labyrinthorgan. Ihr in den Grundzügen ähnlicher Bau, die gleichartige Innervation und die Aehnlichkeiten in der Funktion weisen auf einen genetischen Zusammenhang dieser drei Organformen hin.

Die Seitenorgane der Fische bilden ein System von Kanälen, das mit einem Hauptast jederseits zur Seite des Rumpfes bis zum Schwanz hinläuft und am Kopf sich in mehrere Aeste spaltet, von denen im allgemeinen einer über dem Auge (Canalis supraorbitalis), einer unter dem Auge (Canalis infraorbitalis) und einer am Unterkiefer (Canalis mandibularis) verläuft. Die Kanäle liegen nahe unter der Oberfläche, öffnen sich von Stelle zu Stelle mit einem Loch nach außen und sind mit Schleim erfüllt. Sie enthalten in bestimmten Abständen voneinander mehr oder weniger große Gruppen von Sinneszellen, deren Sinnesborsten in den Kanal hineinragen und zwischen denen Stützzellen stehen. Die Versuche Hofers am Hecht haben gezeigt, daß der adäquate Reiz für diese Organe strömende Bewegungen des Wassers sind, über deren Stärke und Richtung sie den Fisch unterrichten. Es wird durch den Druck der Strömungen wahrscheinlich die Schleimmasse in Bewegung gesetzt und damit ein Reiz auf die Sinneshärchen ausgeübt. Feste Körper können durch ihre Vermittelung von den Fischen vermittels reflektierter Wellen „von ferne gespürt" werden. Bei den Holocephalen (Chimaera) sind statt der Kanäle Gräben vorhanden, die ihrer ganzen Länge nach offen sind. — Den Seitenorganen der Fische entsprechen nach Bau und Verrichtung die Sinneshügel der Amphibienlarven und erwachsenen Amphibien, soweit sie im Wasser leben; sie sind in gleicher Weise verteilt, stehen aber frei auf der Hautoberfläche. Die Sinneszellen stehen in kurzen Reihen nebeneinander, deren Richtung bald parallel zur Längsachse des Tieres, bald senkrecht zu ihr steht (Fig. 13); daher wirken verschieden gerichtete Strömungen auf die einzelnen Organe in verschiedener Weise, d. h. maximal auf die Organe, welche senkrecht zur Strömungsrichtung stehen.

Die Gallertröhren oder Lorenzinischen Ampullen stehen in Gruppen am Kopf der Selachier. Das Gemeinsame im Bau dieser variablen Organe ist folgendes: Es sind dünnhäutige Röhren, die an der Oberfläche münden, die Haut durchbohren und an ihrem blinden Ende Aussackungen in wechselnder Zahl tragen, die Ampullensäckchen (Fig. 14). Die Wand der letzteren ist von Sinnesepithel ausgekleidet: sekundäre Sinneszellen, deren plumpe starre Stifte über die Oberfläche der umgebenden Stützzellen nicht hinausragen (Fig. 15). Die ganze Röhre mitsamt den Säckchen ist von einem gallertigen Schleim erfüllt, der von den Zellen der Röhrenwand stammt und die Fortleitung der mechanischen Reize von der Oberfläche zum Sinnesepithel vermittelt. Die an die Ampullensäckchen herantretenden Nervenendbäumchen gehören zu Zellkörpern, die nahe unter der Ampulle liegen und von denen eine markhaltige Nervenfaser zum Zentralorgan ausgeht. Der adäquate Reiz dürften ebenfalls Wasserströmungen sein. — Die Savischen Bläschen des Zitterrochens sind ähnliche Organe, bei denen aber die Röhre nicht auf der Oberfläche mündet, sondern blind geschlossen ist.

Von allgemeiner Verbreitung bei den Wirbeltieren ist das Labyrinthorgan, das in seinem Innern eine Anzahl verschieden wirkender Sinnesapparate enthält: ein Organ, das durch Winkeldrehungen des Kopfes und Körpers erregt wird, ein anderes, das horizontale Beschleunigungen und Verzögerungen der Bewegungen und wahrscheinlich auch Wechsel in der Kopf- oder Körperhaltung im Verhältnis zur Lotlinie signalisiert, und schließlich meist auch ein Hörorgan. Das Labryinthorgan entsteht durch Einstülpung eines kleinen Epidermisbezirkes jederseits vom verlängerten Mark, der sich als „Hörbläschen" von der Oberfläche ablöst und weitere Umbildungen erfährt. Das Bläschen teilt sich in zwei Hauptabschnitte, die durch eine Einschnürung voneinander getrennt sind, den Utriculus und den Sacculus (Fig. 16). Am Utriculus entstehen drei halbkreisförmige Kanäle, die Bogengänge; sie fallen in drei zueinander senkrecht stehende Ebenen, und zwar können wir dementsprechend 2 senkrechte (einen vorderen und einen hinteren) und einen horizontalen Bogengang unterscheiden. Die beiden senkrechten Bogengänge entspringen meist mit gemeinsamer Wurzel aus dem Utriculus und sind an ihrer anderen Einmündung in denselben zu einer Ampulle erweitert; der horizontale Bogengang zeigt eine solche Ampulle an seiner vorderen Mündung. Der



Fig. 13. Vorderteil des Grottenolms (Proteus anguineus). Von der Seite und etwas von oben. Mit Sinneshügeln in zwei Reihen (1, 2) am Rumpf und zahlreichen solchen am Kopf (3); die Sinneshaare stehen in der Richtung der Linien nebeneinander. Nach Malbranc.

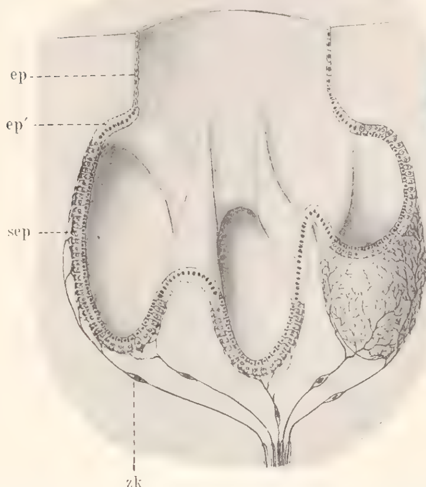


Fig. 14. Stück einer Lorenzinischen Ampulle von Acanthias: unteres Ende des Hauptganges mit drei Ampullensäckchen. Aufgeschnitten. ep Epithel des Hauptganges, ep′ Uebergangsepithel, sep Sinnesepithel, zk Zellkörper des Neurons, von dem die Endbäumchen ausgehen. Kombiniert nach Forssell und Retzius.



Fig. 15. Stück des Sinnesepithels aus der Lorenzinischen Ampulle von Acanthias. ep indifferente Epithelzellen, sz flaschenförmige Sinneszellen, ne Nervenendigungen. Nach Retzius.

Sacculus trägt einen mehr oder weniger langen röhrenförmigen Fortsatz, den Ductus endolymphaticus, der bei den Selachiern auf der Oberfläche des Kopfes frei nach außen mündet, während er bei anderen Wirbeltieren blind in Skeletteilen des Schädels endigt. Außerdem ist der Sacculus zu einem mehr oder weniger umfangreichen Anhang ausgebuchtet, der Lagena, die bei Fischen unbedeutend ist, bei Amphibien und mehr noch bei Sauropsiden an Größe zunimmt und bei Säugern als Schneckengang (Ductus cochlearis) mehrfache Spiralwindungen beschreibt (Fig. 16, A bis D). Abweichend verhält sich nur das Labyrinthorgan der Cyklostomen,

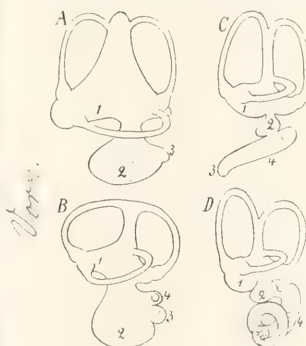


Fig. 16. Linkes Labyrinth von außen; von Knochenfisch (A), Frosch (B), Vogel (C) und Säuger (D). 1 Macula utriculi, 2 Macula sacculi, 3 Macula lagenae, 4 Basilarpapille in der Lagena, in D = Schneckengang. Der Ductus endolymphaticus ist fortgelassen.

das bei Myxinoiden an einem einheitlichen Saccus einen Bogengang trägt, bei Petromyzonten einen zweigeteilten Saccus mit vorderem und hinterem Bogengang aufweist. Die epitheliale Wand des Labyrinthbläschens ist durch eine aufgelagerte Bindegewebsschicht verdickt; sein Inneres ist mit einer eiweißhaltigen Flüssigkeit, der Endolymphe, erfüllt. Das Labyrinth ist in den Knorpel oder Knochen (Felsenbein) eingebettet, doch durch einen schmalen Lymphraum (perilymphatischen Raum) von ihm getrennt; nur an den Stellen, wo Nerven an das Labyrinth herantreten, liegt seine Wand dem Knochen unmittelbar an. Die das Labyrinth umgebende Skeletthülle heißt knorpeliges oder knöchernes Labyrinth.

Das Labyrinthorgan wird nur vom 8. Gehirnnerven, dem Nervus acusticus versorgt, der als sensorische Wurzel des Facialis aufzufassen ist. Seine Fasern entspringen von peripheren bipolaren Zellkörpern (Ganglienzellen); die zentralen Nervenfasern treten in das verlängerte Mark ein, die peripheren Fortsätze verlaufen zu einer Anzahl gesonderter Gruppen von sekundären Sinneszellen im Labyrinthepithel. Jeder Bogengang enthält in seiner Ampulle eine solche Gruppe (die sogenannten Cristae acusticae), deren Zellen lange starre Sinneshaare tragen, die frei in die Ampulle hineinragen; im Utriculus und Sacculus findet sich regelmäßig eine größere Gruppe von Sinneszellen, die sogenannte Macula utriculi und sacculi, daneben noch im Utriculus bei Fischen und Amphibien eine kleinere Gruppe, die Macula neglecta; auch in der Lagena ist eine Macula vorhanden (Macula lagenae). Die drei ersteren und bei den Fischen auch die Macula lagenae tragen auf den borstenförmigen dichtstehenden Haaren der Sinneszellen einen sogenannten Statolithen (früher Otolith genannt), d. h. ein Konkrement von mehr oder weniger fest verbundenen Kalkkriställchen. Bei den Wirbeltieren von den Amphibien aufwärts ist dagegen die Macula der Lagena zu einem besonderen Sinnesapparat umgestaltet, dem Hörapparat.

Die verschiedenen im Labyrinthbläschen enthaltenen Sinnesapparate funktionieren nun in folgender Weise: In den Bogengängen bewegt sich bei Drehbewegungen (Winkelbewegungen) des Kopfes die Endolymphe infolge ihres Beharrungsvermögens in entgegengesetzter Richtung und reizt damit die in die Ampullen hereinragenden Haare der Sinneszellen; und zwar wird jedesmal in jenem Bogengange eine Strömung der Endolymphe eintreten, dessen Ebene mit der Drehungsebene zusammenfällt oder ihr am nächsten kommt, bei mittleren Richtungen in mehreren Bogengängen zugleich. Erzeugt man bei einer Taube z. B. künstlich durch direkten Eingriff eine Strömung in einem Bogengange, so antwortet sie darauf mit einer Drehung des Kopfes in der gleichen Ebene und Richtung, als ob sie eine erzwungene Drehung nach der entgegengesetzten Richtung ausgleichen müßte. Die Sinnesorgane der Bogengänge signalisieren also dem Tiere derartige Bewegungen. — Die Statolithenorgane im Utriculus und Sacculus müssen derart wirken, daß infolge des Beharrungsvermögens der Statolithen bei verminderter oder gesteigerter Geschwindigkeit einer geradlinigen Bewegung, also auch beim plötzlichen Aufhören oder beim Beginn einer solchen der Statolith auf die unterliegenden Sinneshärchen einen Zug nach der Bewegungsrichtung oder nach der entgegengesetzten Richtung ausübt. Bei ruhenden Tieren wird der Statolith stets in der Richtung der Schwerkraft, also senkrecht nach unten auf die ihn tragenden Sinneshaare drücken, also bei verschiedener Haltung des Kopfes einen verschiedenartigen Reiz auslösen. Das Statolithenorgan wird also durch Geschwindigkeitsänderungen und Haltungsänderungen erregt.

Die Lagena endlich dient als Hörorgan, d. h. die in ihr liegenden Sinneszellen werden durch Wellenbewegungen von bestimmter Frequenz (zwischen 20 und 41000 in der Sekunde) gereizt. Es gilt dies aber nur für die Wirbeltiere von den Amphibien aufwärts. Das Labyrinthorgan der Fische wird, wie eingehende Versuche von Kreidl u. a. zeigen, durch Wellenbewegungen, die auf uns als Töne wirken, nicht erregt, wie auch in ihrer Lagena ein Statolithenapparat vorhanden ist, ein Hörapparat aber, wie er im folgenden geschildert wird, vollkommen fehlt. Die Einrichtungen des Hörapparates sind folgende: die basale Fläche der Lagena ist zwischen den benachbarten knöchernen Wänden des perilymphatischen Raumes wie in einem Rahmen eingespannt, so daß auf dem Querschnitt (Fig. 17) drei übereinanderliegende Räume entstehen; sie werden bei den Säugern mit ihrer spiralig gewundenen Lagena als Treppen (Scalae) bezeichnet, und zwar der mittlere als Scala media oder einfach Schneckengang (Ductus cochlearis), der obere und untere als Vorhofs- und Paukentreppe (Scala vestibuli und tympani); jener ist mit Endolymphe, diese beiden sind mit Perilymphe erfüllt. Die Wand des Schneckenganges, die an die Paukentreppe grenzt, die sogenannte Cortische Membran, trägt das Sinnesepithel: in der Längsrichtung des Schneckenganges ist das Epithel dieser Membran von den sogenannten Cortischen Bogen durchzogen, die durch zwei schräg gegeneinander gelehnte zellige Pfeiler gebildet werden (Fig. 17); zu beiden Seiten der Pfeiler stehen zwischen

Stützzellen einige sekundäre Sinneszellen, zu denen die Nervenendbäumchen von Zellkörpern des benachbarten Hörganglions, des Ganglion spirale bei den Säugern, herantreten. Von der nach der Schneckenachse zu gelegenen Wand des Schnecken-

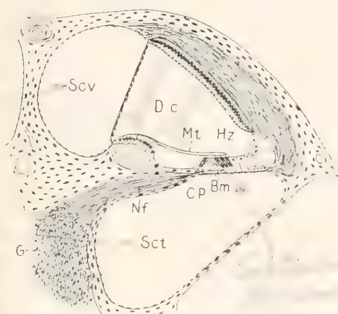


Fig. 17. Querschnitt durch den Schneckengang (D. c. = Ductus cochlearis) und die benachbarten perilymphatischen Räume (Sct = Scala tympani, Scv = Scala vestibuli) einer Fledermaus. Knochen punktiert. Bm Basalmembran, C. P. Cortische Pfeiler, Hz Hörzellen (schwarz), Mt Deckmembran; G Ganglion des Hörnerven (Ggl. spirale), von dessen Zellen die Nervenfasern Nf zu den Hörzellen gehen.

ganges legt sich über die Sinneszellen eine Lamelle, die Deckmembran, die von Wandzellen des Schneckenganges nach Art einer Cuticula gebildet ist; sie berührt die Sinneshärchen der Hörzellen. Die Cortische Membran wird verstärkt durch Bindegewebsfasern, die unter ihr quer von Wand zu Wand gespannt sind und nach der Spitze der Schnecke an Länge zunehmen, entsprechend der zunehmenden Breite des Schneckenganges, die beim neugeborenen Menschen 0,041 mm im untersten bis zu 0,495 mm im obersten Teil der Schnecke ansteigt. Die Reizung der Hörzellen geschieht nach der Helmholtzschen Resonanztheorie, die allerdings nicht unbestritten ist, in der Weise, daß Wellenbewegungen der Luft vermittels eines gleich zu besprechenden Mechanismus auf die Perilymphe in der Paukentreppe übertragen werden und diese ihrerseits diejenigen Fasern der Cortischen Membran zur Mitschwingung veranlaßt, deren Länge der Wellenlänge der betreffenden Schwingungen entspricht. Die Bewegung dieser Fasern bewirkt, daß die über ihnen stehenden Hörzellen gegen die Deckmembran, die ja der knöchernen Wand ansitzt und daher nicht mitschwingt, gestoßen und dadurch gereizt werden. Einem Ton von bestimmter Wellenlänge entspricht daher jedesmal die Erregung bestimmter Hörzellen.

Zur Uebertragung der Luftwellen auf die Perilymphe dienen eine Reihe von Einrichtungen (Fig. 18). Zunächst ist bei denjenigen

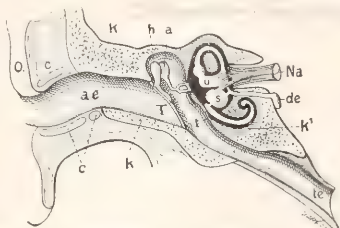


Fig. 18. Schematischer Durchschnitt durch das Gehororgan eines Säugers. O Basis der Ohrmuschel, c Ohrknorpel, ae äußerer Gehorgang, K Knochen, K' besonders harter Teil desselben in der Umgebung des Labyrinths, T Trommelfell, t rundes Fensterchen, h Hammer, a Ambos mit Steigbügel, im Mittelohr liegend, u Utriculus, s Sacculus, de Ductus endolymphaticus, Na Hörnerv, te Tuba Eustachii. Aus R. Hertwig.

Tieren, deren Labyrinth ein Hörorgan besitzt, das Labyrinth mit der Außenwelt in der Weise in Verbindung gesetzt, daß es dicht an die Wandung der 1. Schlundspalte (die bei den Selachiern als Spritzloch fortbesteht) gelagert wird; diese Spalte ist nach außen durch eine straffgespannte Membran, das Trommelfell, verschlossen und hat sich zum Mittelohr erweitert; ihre Einmündung in die Mundhöhle besteht als Eustachische Röhre fort. Durch die Luftwellen wird das Trommelfell in Schwingungen versetzt, und diese werden durch ein Skelettstück oder eine Reihe von solchen zu einem Loch („Fenster") in der Wand des knöchernen Labyrinths weitergeleitet und so auf die den perilymphatischen Raum erfüllende Flüssigkeit übertragen; so kommen sie zur Paukentreppe, die ja auch nichts ist als ein perilymphatischer Raum. Die Uebertragung geschieht bei Amphibien, Reptilien und Vögeln durch ein Knöchelchen, die Columella, das bei der Erweiterung der ersten Schlundspalte aus deren Wand in den Innenraum verlagert wurde; es ist das proximale Ende des Hyoidbogens, also ein Stück des bei den Luftatmern funktionslosen Kiemenskeletts, das diese Verbindung besorgt, und zwar liegt es mit seinem distalen Ende dem Trommelfell, mit seinem proximalen Ende dem sogenannten runden Fensterchen der knöchernen Labyrinthwand an. Bei den Säugern wird die Verbindung durch eine Reihe von drei gelenkig verbundenen Knöchelchen her-

gestellt, die von außen nach innen als Hammer, Ambos und Steigbügel bezeichnet werden. Der Steigbügel, dessen Platte in das ovale Fensterchen der knöchernen Labyrinthwand paßt, entspricht der Columella und hat dieselbe Herkunft wie diese. Ambos und Hammer dagegen sind durch Umbildung von Skelettstücken entstanden, die bei den Reptilien und Vögeln das Unterkiefergelenk bilden und beim Embryo in der Vorderwand der 1. Schlundspalte liegen: der Ambos entspricht dem Quadratum, der Hammer dem Articulare des Unterkiefers bei jenen; der Unterkiefer der Säuger aber hat eine neue, weiter nach vorn gelegene Einlenkung am Schädel bekommen. Der Hammer liegt mit seinem Stiel dem Trommelfell an, macht dessen Schwingungen mit, und durch die gelenkende Knochenkette werden diese mit verringerter Amplitude, dafür aber gesteigerter Kraft auf die Verschlußmembran des ovalen Fensters und so auf die Perilymphe, speziell die der Paukentreppe, übertragen. Da die Perilymphe aber als Flüssigkeit nicht komprimierbar ist, so muß ihr Gelegenheit zum ausweichen geboten sein, wenn sie die Schwingungen der Steigbügelplatte gestatten und mitmachen soll: das knöcherne Labyrinth hat noch ein zweites, durch eine elastische Membran verschlossenes Fenster, das runde Fenster, zu dem die Flüssigkeitsschwingungen aber nur gelangen können, wenn sie zuvor die Paukentreppe und die im Scheitel der Schnecke mit ihr verbundene Vorhofstreppe durchlaufen haben; dieses gibt dann den Schwingungen der Perilymphe nach, indem es sich gegen das Mittelohr vorwölbt.

Das Trommelfell liegt bei den Amphibien und den Schildkröten ganz an der Oberfläche des Kopfes; bei den übrigen Reptilien ist es zu seinem Schutze mehr oder weniger tief versenkt und liegt im Grunde des sogenannten äußeren Gehörganges, der bei den Vögeln und noch mehr bei den Säugern vertieft ist. Bei den Säugern ist der Rand des äußeren Gehörganges von einer Hautfalte umgeben, der Ohrmuschel; von den übrigen Wirbeltieren zeigen nur die Eulen eine ähnliche Einrichtung in Gestalt einer aufrichtbaren und einklappbaren, durch randständige Federn vergrößerten Hautfalte. Bei den Säugern verhindert ein korpeliges Skelett das Zusammenklappen des Gehörgangs und setzt sich ununterbrochen in die Knorpelplatte der Ohrmuschel fort. Die Ohrmuschel bildet einen Schalltrichter, der durch Muskeln bewegt und der Richtung, aus welcher der Schall kommt, zugekehrt wird; die sensorischen Nerven der Muskeln orientieren das Tier über den Betrag dieser Bewegung und somit über pie Richtung der Schallquelle. Die Ohrmuschel ist nicht einfach glatt, sondern von allerhand Falten durchzogen und durch Vorsprünge uneben. Die Falten dienen teilweise der Festigung der Ohrmuschel, andere bewirken zusammen mit den Vorsprüngen den Verschluß der Ohrmuschel und damit des Gehörgangs. Ein Verschluß der Ohrmuschel ist bei vielen Säugern zu beobachten; beim Meerschweinchen (Fig. 19, C) z. B. wird die Ohrmuschel beim Eintauchen in Wasser oder beim Elektrisieren so zusammengelegt, daß sich einmal die Helix (h) gegen die Längsfalte (lf) und den Crus anthelicis superior (crahs) einrollt, ferner der letztere sich an seinen Gegenpart (crahi) anlegt, Tragus (tr) und Antitragus (atr) sich bis zur Berührung nähern und der Antitragus

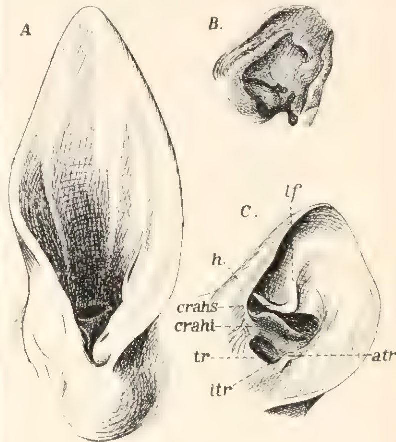


Fig. 19. Ohrmuscheln von Hirsch (A), Fischotter (B) und Meerschweinchen (C). atr Antitragus, crahi und crahs Crus anthelicis inferior und superior, h Helix, itr Incisura intertragica, lf Längsfalte, tr Tragus. Nach Boas.

als starker Wulst vor den Eingang zum Gehörgang gedrückt wird; für Erde und Sand beim Graben ist dann die Ohrmuschel geschlossen. Die sehr wechselnde Gestalt der Ohrmuschel erklärt sich aus diesen mehrfachen Funktionen, deren eine oder andere entsprechend der Lebensweise des Tieres mehr hervortreten kann. So ist beim Hirsch (Fig. 19, A), beim Hasen, beim Wildschwein die Ohrmuschel ein extremer Schalltrichter, bei Fischotter (Fig. 19, B), Wühlratte u. a. überwiegt die Funktion als Verschlußapparat, während bei der Fledermaus, dem Meerschweinchen (Fig. 19, C) oder der Hausmaus beide Vorrichtungen nebeneinander wirksam sind.

Hier sei gleich die Betrachtung des Gehörapparates bei wirbellosen Tieren angeschlossen. Es kommen dafür nur Lufttiere in Betracht, Spinnentiere und Insekten. Bei allen übrigen Wirbellosen konnte entweder eine Reaktion auf Schallwellen überhaupt nicht nachgewiesen werden, oder in den seltenen Fällen, wo eine solche eintritt, z. B. bei der Aktinie Edwardsia lucifuga sind es eben Tastreize, keinesfalls

aber Reizung eines besonderen Hörorgans. Bei den Insekten jedoch sind, zugleich in einem gewissen Zusammenhang mit der häufigen Hervorbringung von Tönen, Gehörorgane vorhanden und genau untersucht; bei großer Gleichförmigkeit in den zusammensetzenden Elementen zeichnen sie sich durch eine wunderbare Mannigfaltigkeit des Aufbaues und der örtlichen Verteilung aus.

In jenen Hörorganen der Insekten, die sich experimentell sicher als solche nachweisen lassen, nämlich bei denen in der Schiene der Vorderbeine bei den Laubheuschrecken, sind die Sinneszellen durch den Besitz eines eigenartigen Endapparates ausgezeichnet, der als Stiftchenapparat bezeichnet wird (Fig. 20), die Zellen als Stift-

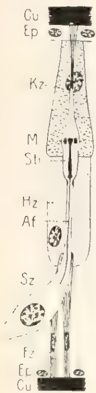


Fig. 20. „Endschlauch" des Chordonalorgans aus dem Schwingkölbchen einer Fliege. Schematisch (Ausmaße zu plump). cu Cuticula, Ep Epidermis, Sz Sinneszelle, Af Achsenfibrille, Sti Stiftchen mit M muffartiger Stiftchenhülle, Hz Hüllzelle, Kz Kappenzelle, Fz Faserzellen.

chenzellen (scolopophore Zellen). Jede dieser Zellen kommt in Verbindung mit zwei anderen Zellen vor, der Hüllzelle und der Kappenzelle: das distale Ende der Sinneszelle (der „Endschlauch") mit den Stiftchen steckt in der Kappenzelle, und die Hüllzelle umgibt im unmittelbaren Anschluß daran den folgenden Abschnitt der Sinneszelle. Eine solche Kombination von Zellen findet sich weit verbreitet bei den Insekten im Innern des Körpers in den verschiedenen Körperregionen, in Anordnungen, die für eine Uebertragung von Luftwellen auf diesen Apparat geeignet erscheinen. Nicht die Stiftchen selbst sind die aufnehmende Nervenendigung, sondern sie bilden nur die Hülle für diese; aus der Stiftchenzelle tritt ein fibrillärer Strang in die cuticuläre, mit Rippenbildungen gefestigte Stiftchenhülle und verbreitert sich im Endteil derselben in wechselnder Weise, die für die verschiedenen Insektengruppen charakteristisch ist.

Meist sind die Stiftchenzellen mit ihren Begleitzellen so angebracht, daß sie sich zwischen zwei Punkten des Chitinpanzers, die gegeneinander relativ unbeweglich sind, ausspannen (Fig. 20), wie u. a. im Subgenualorgan der Laubheuschrecken (Fig. 21, Subg.-O);

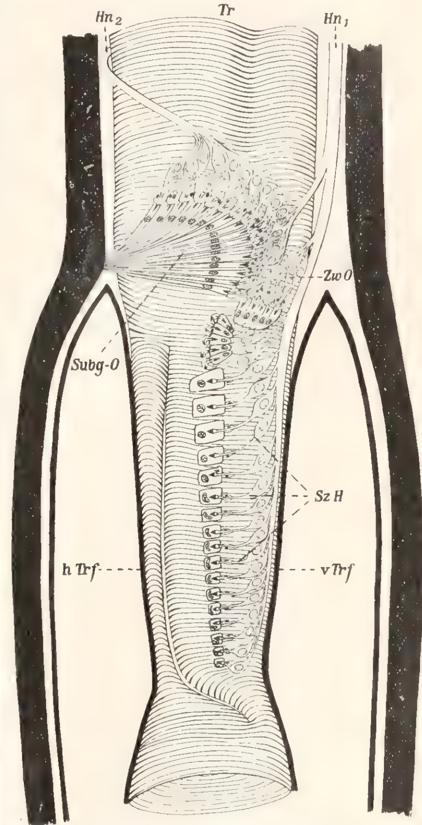


Fig. 21. Tibiales Hörorgan der Laubheuschrecke Locusta viridissima. Subg-O Subgenualorgan, ZwO Zwischenorgan, SzH Sinneszellen der Hörleiste, Hn_1, Hn_2 Aeste des Hörnerven, hTrf, vTrf hinteres, vorderes Trommelfell in der Trommelkammer, (vgl. Fig. 24, B). Vereinfacht nach Schwabe.

nach dieser an die schwingende Saite eines Musikinstruments erinnernden Anordnung hat Graber solche Organe Chordotonalorgane genannt. Das Schwingen der Saite

und die Uebertragung der Schallwellen werden vielfach dadurch erleichtert, daß das Organ einer erweiterten Trachee aufliegt (z. B. bei Corixa), und als besondere Einrichtungen für die Schallübertragung können noch dünne, straff ausgespannte Abschnitte der Körpercuticula, die sogenannten Trommelfelle, hinzukommen, wodurch das Organ zu einem „Tympanalorgan" wird, wie z. B. bei Heuschrecken und Grillen, Eulen und Spannern.

Die Chordotonalorgane sind wahrscheinlich von Hautsinnesorganen abzuleiten; es sind solche bekannt, deren rezipierende Zellen durchaus an die Stiftchenzellen der Hörorgane erinnern, wie die Sinnesschuppen der Schmetterlinge (Fig. 5) oder die sogenannten Sinnespapillen auf den Schmetterlingsflügeln und an den Schwingkölbchen der Zweiflügler. In manchen Fällen finden sich die Chordotonalorgane durch den ganzen Körper des Insekts verstreut, so z. B. bei der Larve des Schwimmkäfers Dytiscus: hier findet man sie, jedes aus nur wenigen Zellen zusammengesetzt, metamer in den Segmenten des Rumpfes, in den Antennen, in den Tastern der Mittelkiefer und der Unterlippe, in der Unterlippe selbst und in allen drei Beinpaaren. Die metamere Verbreitung in den Körpersegmenten ist auch sonst bei manchen durchsichtigen Larven von Käfern, Schmetterlingen, Dipteren und Hymenopteren nachgewiesen. Wenn wir solche universelle Verbreitung dieser Organe als das Ursprüngliche ansehen müssen, so erklärt sich damit leicht, daß bei zunehmender Lokalisierung der Hörorgane stärkere Ansammlungen von stiftchentragenden Zellen zu besonderen großen Hörapparaten an ganz verschiedenen Stellen des Insektenkörpers gelegen sein können. Sehr häufig sind solche Apparate in den Schienen der Beine dicht unter dem Schenkelgelenk („Knie", daher Subgenualorgane) gelegen: so bei vielen Geradflüglern (Heuschrecken, Grillen, Blatta), Pseudoneuropteren (Libellenlarven, Perliden) und Hymenopteren (Ameisen und Bienen). Unter den Schmetterlingen haben die Tagfalter Chordotonalorgane am Grunde der beiden Flügelpaare, bei den Eulen und einigen Spinnern sind sie in den Seitenteilen des Brustabschnittes, bei den Spannern und Zünslern an der Basis des Hinterleibes gelegen; dort finden sie sich auch bei den Feldheuschrecken, bei denen außerdem noch Subgenualorgane nachgewiesen sind. Sehr stiftchenreiche Chordotonalorgane finden sich am Brustganglion der Musciden; in der Mittelbrust sind auch die Hörorgane der Wasserwanze Corixa gelegen.

Unabhängig voneinander sind bei verschiedenen Insektengruppen Trommelfelle aufgetreten und dadurch die Chordotonalorgane zu Tympanalorganen geworden. Das ist der Fall bei den Feldheuschrecken am 1. Hinterleibsringe (Fig. 22 und 23) und bei

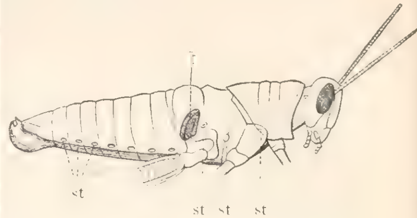


Fig. 22. Grasheuschrecke, ohne Flügel, um die Lage des Trommelfells t zu zeigen. st Stigmen. Aus R. Hertwig.

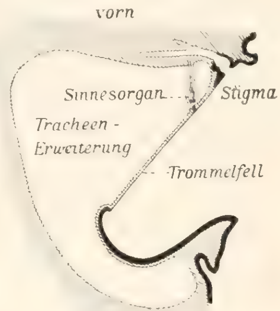
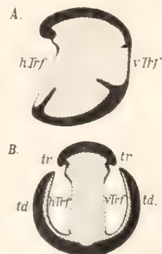


Fig. 23. Horizontaler Längsschnitt durch das Hörorgan einer Grasheuschrecke. Schematisch. Vereinfacht nach Schwabe.

vielen, aber nicht allen Grillen und Laubheuschrecken an den Chordotonalorganen der Vorderschienen, während die gleich gelegenen Organe des 2. und 3. Beinpaares keine Trommelfelle haben; bei manchen liegen die Trommelfelle frei (Fig. 24, A), bei anderen sind sie von einer Chitinfalte (Fig. 24, B, td)

Fig. 24. Querschnitt durch die Vorderschiene einer Grille (A) und der Laubheuschrecke Decticus (B). vTrf, hTrf vorderes, hinteres Trommelfell, td Trommeldecke, tr Trommelritze, in die Trommelkammer führend. Nach Schwabe.



überwölbt, so daß sie in einer nach außen spaltförmig geöffneten Trommelkammer liegen. Unter den Tagfaltern kennt man bei Coenonymphe pamphilus Trommelfelle an der Basis der Vorderflügel, bei anderen sind noch keine gefunden; die Eulen und Spinner haben versenkte Trommelfelle zu Seiten des 3. Brustringes, die Spanner und Zünsler ebenso am 1. Hinterleibsring.

Gewisse, sehr beweglich eingelenkte Sinneshaare der Spinnentiere, die von gewöhnlichen Tasthaaren scharf unterscheidbar sind, werden von Dahl für Hörhaare erklärt; sie stehen bei den Skorpionen und Afterskorpionen auf den scherenförmigen Endgliedern der Palpen, bei den echten Spinnen auf den Palpen und den Beinen, und bei den Milben auf dem Vorderteil des Rumpfes. Für die Deutung dieser Organe spricht, daß einerseits Spinnen durch das Brummen einer Fliege erregt werden, und daß man andererseits unter starker Vergrößerung die Haare beim Anstreichen eines tiefen Tones schwingen sieht.

Schließlich sind auch die statischen Organe nichts als eine Modifikation der Organe des mechanischen Sinnes. In ihnen wirkt ein schwerer Körper, der Statolith, ziehend oder drückend auf Sinneshaare. Demgemäß werden die Organe in Erregung versetzt, wenn der Körper des Tieres seine Haltung im Verhältnis zur Lotlinie ändert, da der Statolith stets in der Richtung der Schwerkraft zieht oder drückt und so seine Einwirkung auf die Sinneshaare bei Haltungsveränderungen des Körpers sich ändert. Sie sind also beteiligt bei der Regulierung der Körperhaltung (s. unten) und werden daher auch wohl als Gleichgewichtsorgane bezeichnet.

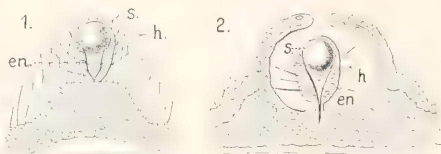


Fig. 25. Statolithenorgane der Hydromedusen Aeginopsis (1) und Rhopalonema (2). s Statolith, en Entoderm, h Sinneshaare. Nach R. Hertwig.

Wir können zwei Typen statischer Organe unterscheiden: die Klöppelorgane und die Statocysten. Erstere kommen fast nur bei den Medusen vor, und zwar sind sie dort in einer großen Mannigfaltigkeit von Formen vorhanden. Bei den Randquallen (Hydromedusen) liegt der Statolith am Ende eines Stieles, der ein epitheliales Hohlgebilde ist und in dem Hohlraum an seinem Ende den Statolithen ausscheidet. Der Stiel sitzt nahe dem Schirmrand und wirkt entweder durch Druck auf die Haare benachbarter Sinneszellen, oder er trägt selbst Sinneszellen, die sich an den benachbarten Wänden stoßen (Fig. 25, 1 und 2). Bei manchen Arten (Aequorea, Rhopalonema) ist durch Faltenbildungen des Ektoderms eine Hülle um das Klöppelorgan entstanden (Fig. 25, 2). In wesentlich anderer Weise ist das Klöppelorgan bei den Scheibenquallen (Scyphomedusen) gebaut. Hier sitzt der Statolith am Ende des sogenannten Randkörpers; die Randkörper (Fig. 26) sind acht am Scheibenrand stehende Ausstülpungen der Körperwand, in die sich ein Kanal des Darmsystems („Gastrovascularkanal“) hinein erstreckt. Das oberflächliche Epithel des Randkörpers enthält im proximalen Abschnitt zahlreiche Sinneszellen und einen dicken intraepithelialen Nervenfilz und zuweilen auch ein einfaches Sehorgan; die Entodermzellen des Endabschnittes sind verlängert und scheiden Kalkkonkremente in sich ab, deren Gesamtheit den Statolithen darstellt (Fig. 26 Kk). In diesem Falle sind aber keine langen Sinnesborsten vorhanden, die bei veränderter Haltung von dem senkrecht nach unten gezogenen Randkörper gedrückt werden könnten; die Wirkung der veränderten Zug- und Druckrichtung dürfte in einer Reizung der an der Basis des Randkörpers stehenden Sinneszellen bestehen. Der kompliziert gebaute Randkörper von Charybdea, der einen kompakten Statolithen enthält und ein hochentwickeltes Auge trägt, wirkt im allgemeinen ebenso. Ein Klöppelorgan ist auch der Statolithenapparat, der bei den Appendicularien und den Larven der Ascidien als unpaares Organ von der Wand der Sinnesblase in deren Inneres vorspringt (Fig. 27) und der noch genauerer Untersuchung bedarf. — Hier mögen auch die Sphaeridien der Seeigel angereiht werden, kugelige Gebilde, die wie

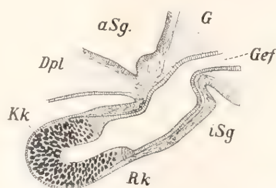


Fig. 26. Randkörper (Rk) mit Statolithenorgan einer Scheibenqualle (Rhizostoma). Im Medianschnitt. Dpl Deckplatte, G Gallerte, Gef Kanal des Darmraums, Kk Kalkkonkremente in Entodermzellen, aSg, iSg äußere, innere Sinnesgrube.

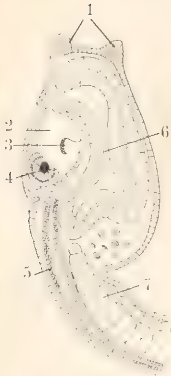


Fig. 27. Medianschnitt durch eine Ascidienlarve, schematisch. 1 Haftpapillen, 2 Sinnesblase, 3 Statolithenorgan, 4 Auge, 5 Medullarrohr, 6 Darm, 7 Chorda.

die Stacheln auf einer Warze der Schale gelenkig angebracht und durch Bindegewebsfasern mit dieser verbunden sind (Fig. 28); sie stehen auf der Mundseite des Seeigels, oft in Gruben der Schale, die zuweilen nahezu oder ganz geschlossen sind und hängen stets senkrecht nach unten, so daß sie bei Haltungsänderungen des Tieres einen Druck auf das Nervenpolster an ihrer Basis ausüben und damit die Haltungsänderung signalisieren.

Ein eigenartiges, als Statolithenorgan gedeutetes Sinnesorgan, das von Stauffacher bei den Blattläusen Chermes coccineus und Phylloxera vastatrix (der Reblaus) entdeckt worden ist, kann im Anhang zu den Klöppelorganen gestellt werden; der

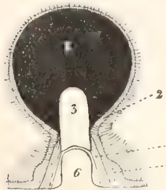


Fig. 28. Sphäridium eines Seeigels. Im Längsschnitt. Schematisch. 1 Kalkmasse des Sphäridiums, 2 Epithel, 3 Kalkstiel, 4 Muskelhülse, 5 Ringganglion, 6 Schalenhöcker, 7 Schale. Aus A. Lang.

Statolith wird im Innern des Bläschens durch Spangen getragen, die von der Blasenwand ausgehen, so daß er „wie der Schwengel einer Glocke" in der Blase hängt (Fig. 29). Der Nerv, der dies Organ innerviert, tritt mit mehreren Aesten an den Statolithen heran und endigt mit kolbenförmigen Anschwellungen in Grübchen („Narben") an der Oberfläche desselben. Wie die Reizung des Nerven zustande kommt, wird aus diesen Bauverhältnissen nicht klar. Die Organe sitzen am Grunde der Vorderflügel, an der Grenze zwischen Vorder- und Mittelbrust. Ein Statholithenorgan ist sonst von keinem Insekt bekannt.

Im Gegensatz zu den Klöppelorganen ruht bei den Statocysten ein freier Statolith oder eine Anzahl von solchen auf einer polsterartigen Gruppe oder einer Reihe von Sinneshaaren, die von ihm, je nach der Haltung, in verschiedener Richtung und Stärke entweder alle gedrückt, oder die einen gezogen, die anderen gedrückt werden. Dieser Apparat steht dann entweder frei auf der Oberfläche und wird durch eine besondere Hülle gegen äußere mechanische Einwirkungen geschützt (Rippenquallen, Fig. 30), oder er ist solchen Einwirkungen dadurch entzogen, daß er in eine Grube eingesenkt (z. B. zehnfüßige Krebse) oder in eine Blase eingeschlossen ist, die nach außen offen sein kann (z. B. manche Muscheln) oder gänzlich gegen die Oberfläche abgeschlossen

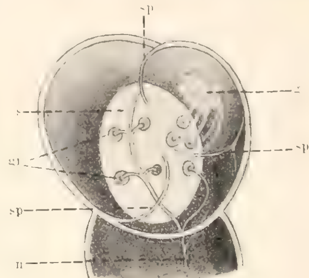


Fig. 29. Statolithenorgan der Reblaus. g Ganglion, gr Grübchen („Narben") des Statolithen s, in dem die Endanschwellungen des Nerven n liegen, sp Spangen, die den Statolithen tragen. Nach Stauffacher.

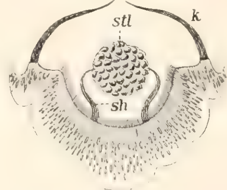


Fig. 30. Statocyste einer Rippenqualle (Callianira). Der Statolith stl ruht auf Büscheln von Sinneshaaren sh und wird überwölbt von einer Kuppel k verschmolzener Wimperhaare. Nach R. Hertwig.

ist (z. B. Mysis). Der Statolith ist entweder ein von den Epithelzellen der Wand abgesondertes Gebilde, das dann oft geschichteten Bau zeigt (Fig. 31), oder es sind zahlreiche an Ort und Stelle gebildete (z. B. Schnecken) oder von außen hereingebrachte (manche Würmer [Fig. 32 und Muscheln) Statolithen vorhanden, oder schließlich ist der Statolith durch Verkleben von Fremdkörpern gebildet, die von außen in die offene Statocyste ein-

gebracht worden sind (zehnfüßige Krebse). Die abgesonderten Statolithen bestehen meist aus kohlensaurem Kalk unter Beimischung organischer Substanz; doch ist im Statolithen des Krebschens Mysis ein organischer Kern mit einer geschichteten Hülle von Fluorcalcium nachgewiesen worden.

Bei den Statocysten mancher Tiere, z. B. mancher Ringelwürmer, Schnecken und Muscheln ist ein Teil der Wand der Statocyste mit Wimperborsten besetzt, die durch ihren Schlag die Füllflüssigkeit der Statocyste in Bewegung setzen. Es fragt sich, wie das mit der Funktion der Statocyste zusammenhängt. Tschachotin gibt dafür bei der Statocyste der Schwimmschnecken (Heteropoden) folgende Erklärung (Fig. 31): Bei dieser kugeligen Statocyste sind die Sinneszellen auf einen Pol beschränkt und bilden dort eine Macula. An den übrigen Teilen der Wand stehen große Zellen mit beweglichen Wimperborsten, die sich in bestimmten Intervallen gleichzeitig aufrichten und den Statolithen gegen die Macula drücken. In den Zwischenzeiten sind die Wimperborsten eingeknickt, machen dabei aber ständige zitternde Bewegungen; durch diese wird die Endolymphe in Strömungen versetzt, deren Richtung in Figur 31 links durch Pfeile angedeutet ist, und durch die Strömungen wird der Statolith in der Mitte der Cyste getragen wie eine Glaskugel durch den Wasserstrahl eines Springbrunnens. Während dieser Zeit können die Sinneszellen ausruhen, um dann, wenn beim Ausruhen der Borsten der Statolith mit ihnen in Berührung kommt, um so lebhafter gereizt zu werden.

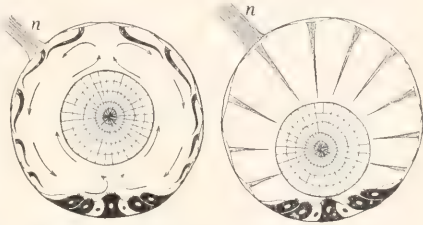


Fig. 31. Statocyste einer Schwimmschnecke (Carinaria). Links mit umgelegten, bewegten Wimperbüscheln, die eine Strömung im Sinne der Pfeile erzeugen; rechts mit aufgerichteten Wimperbüscheln. Sinneszellen schwarz; n Nerv der Statocyste. Nach Tschachotin.


Fig. 32. Statocyste eines Ringelwurms, Arenicola, mit nach außen führendem Kanal. Aus Boas.

Von dem sonstigen einfachen Bauplan der Statocysten weichen diejenigen der Cephalopoden in manchen Beziehungen ab. Sie liegen im Kopfknorpel eingebettet, unter dem Visceralganglion. Ihre Größe ist recht bedeutend, und die innere Oberfläche ist nicht eben, sondern zu einer wechselnden Zahl von Zapfen (12 bei Sepia officinalis) erhoben (Fig. 33). Das Sinnesepithel ist auf bestimmte Stellen der Innenfläche beschränkt; der großen Sinneszellgruppe, der Macula statica princeps (M) liegt ein unregelmäßig gestalteter, geschichteter Statolith auf; neben dieser Stelle sind noch zwei kleinere Sinneszellflecken, die Macula neglecta anterior und posterior (Mn′ und Mn″) vorhanden, und ein langer Streifen von Sinneszellen, die Crista statica (Cr). An allen diesen Stellen tragen die Sinneszellen lange Sinneshärchen. Nur die Macula statica princeps mit ihrem Statolithen funktioniert in ähnlicher Weise wie der Statolithenapparat anderer Tiere; die Sinneszellen der übrigen Maculae und der Crista werden wahrscheinlich durch Strömungen der das Bläschen erfüllenden Flüssigkeit, der Statolymphe erregt, die bei Drehungen des Körpers durch das Beharrungsvermögen der Statolymphe hervorgerufen werden; die Bedeutung der Zapfen scheint darin zu bestehen, daß sie die Richtung dieser Strömungen je nach der Drehungsrichtung des Tieres in bestimmter Weise beeinflussen. Entwickelungsgeschichtlich entsteht die Statocyste auch hier durch eine Einstülpung des Oberflächenepithels, und es bleibt

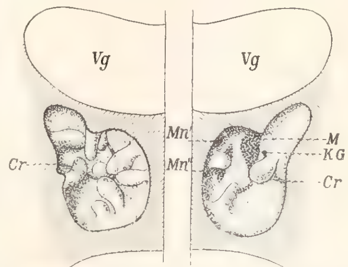


Fig. 33. Rechte Statocyste eines Tintenfisches (Sepia). Aufgeschnitten; links von vorn, rechts von hinten gesehen. Vg Visceralganglion, übrige Bezeichnungen siehe im Text. Nach Cat. Mus. R. Coll. Surgeons.

auch bei der fertigen Statocyste ein enger Kanalgang bestehen, der sogenannte Köllikersche, der sie noch mit der Korperoberfläche verbindet. Die Statocyste der Cephalopoden erinnert in ihrem komplizierten Bau an das Labyrinthorgan der Wirbeltiere, wo auch der Statolithenapparat mit anderen Sinnesorganen vereinigt ist.

Die Lage der Statocysten ist verschieden. Bei den Radiärtieren sind sie meist radiär angeordnet: bei den Quallen, sowohl den Rand- wie den Schirmquallen, liegen sie in der Achtzahl am Schirmrande; bei der Holothurie Synapta liegen diese paarweise an den 5 Radialnerven, nahe deren Ursprung aus dem Nervenring, in die Leibeswand eingebettet. Die Rippenquallen besitzen nur ein Statolithenorgan (Fig. 30), und dieses liegt am aboralen Pole, dem sogenannten Sinnespol; der Statolith ruht auf 4 federartig eingekrümmten Bündeln von Sinneshaaren, und der ganze Apparat ist von einer Kuppel aus verklebten Haaren überdeckt und geschützt. — Bei den bilateralsymmetrischen Tieren liegen die Statolithenorgane meist zu beiden Seiten des zentralen Nervensystems, bei den Würmern zu Seiten des Unterschlundganglions, zuweilen auch metamer in mehreren Segmenten (im 6. bis 10. Segmente bei Aricia acustica), bei den Mollusken meist in der Nähe des Pedalganglions, während der Nerv zum Cerebralganglion verläuft. Sehr wechselnd ist die Lage der Statolithenapparate bei den Krebsen (Fig. 34). Wir finden solche bei manchen Ringelkrebsen (Arthrostraca), und zwar bei Amphipoden (C) vorn im Kopf, vor dem Cerebralganglion, bei manchen Asseln (A) ebenfalls im Kopf, in seitlichen Zipfeln, bei anderen (B) im letzten Abdominalsegment, dem Telson. Bei den Schizopoden (Mysis und Verwandte, D) liegen die Statocysten in den Innenästen des letzten Abdominalbeinpaares. Die Dekapoden (E) haben offene Statocysten, die auf der Dorsalseite des Basalgliedes der ersten Antenne liegen; die Statolithen in ihnen sind nicht einfach Abscheidungsprodukte, sondern sie werden aus Fremdkörpern gebildet, die durch eine abgeschiedene Substanz zu einem einheitlichen Statolithen verklebt sind. Da das Innere der Statocystengrube hier von dem Chitin der äußeren Haut ausgekleidet wird, muß es auch bei der Häutung mit dem übrigen Chitinpanzer abgestoßen werden. Dadurch werden auch die Statolithen entfernt, und der Krebs muß nach der Häutung für neue Statolithen sorgen. Dies tut er, indem er Fremdkörperchen mit Hilfe seiner Scheren in die Grube bringt; setzt man einen frisch gehäuteten Krebs in ein Glasgefäß, auf dessen Boden er nichts anderes findet als Harnsäurekriställchen, so kann man dann durch die chemische Reaktion nachweisen, daß die Statolithen aus solchen verklebt sind.

Diese Eigentümlichkeit der zehnfüßigen Krebse wurde von Kreidl benutzt, um den direkten Beweis zu erbringen, daß die Statolithenorgane wirklich die Funktion haben, das Tier über seine Lage im Raum zu orientieren und nicht, wie früher angenommen, Hörorgane sind (Versuche zeigen, daß nicht bloß die Krebse, sondern

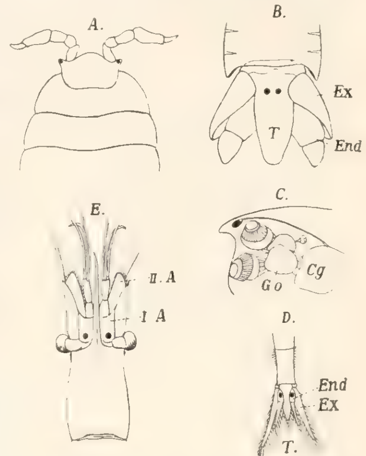


Fig. 34. Lage der Statocysten (als schwarze Punkte dargestellt) bei Krebsen: A Landassel Platyarthrus, B Assel Anthura gracilis, C Flohkrebs Ampelisca, D Schizopode Leptomysis, E Dekapode Palaemon. I A, II A erste, zweite Antenne, End Endopodit, Ex Exopodit, T Telson. Nach Wenig, Thienemann, Strauß, Sars, Kreidl.

auch alle übrigen Wassertiere, mit Ausnahme der Wasserinsekten und Wassersäuger, nicht auf Töne reagieren). Setzt man einen Palaemon, der kurz vor der Häutung steht, in ein Becken, auf dessen Boden sich feinster, durch Fällung gewonnener Eisenstaub befindet, und nimmt ihm gleich nach der Häutung seine alte Schale fort, so füllt er Eisenstaub in seine Statocysten und bekommt so eiserne Statolithen. Diese kann man durch einen Elektromagneten beeinflussen. Bringt man einen solchen in die Nähe des Krebses und läßt ihn in horizontaler Richtung auf diesen einwirken, so greifen am Statolithen jetzt zwei Kräfte an (Fig. 35): die Schwerkraft (S) zieht senkrecht nach unten, die Magnetkraft (M) wagrecht nach der Seite; die Resultierende (R) aus beiden Kräften wirkt schräg nach der Seite und nach unten. Der Statolith drückt unter diesem Einfluß auf die Sinneshaare so, als ob der Krebs um etwa 45° um seine Längsachse gegen den Magneten zu gedreht wäre. Dem entspricht die Reaktion des Krebses: er dreht sich von dem

Magneten weg, als müßte er eine solche gewaltsame Drehung kompensieren und erreicht dadurch, daß der Statolith jetzt so auf die darunter liegenden Sinneshaare drückt wie bei gewöhnlicher Haltung ohne Beeinflussung durch den Magneten (Fig. 35).

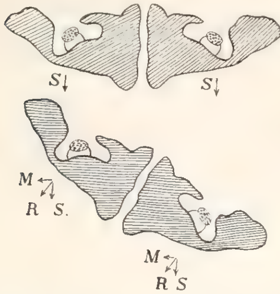


Fig. 35. Schematischer Querschnitt durch die Basalglieder der 1. Antenne von Palaemon. Oben bei normaler Haltung unter Einwirkung der Schwerkraft S allein, unten bei der unter Einwirkung des Magneten angenommenen Abwehrstellung.

Nicht allen Tieren kommen Statolithenorgane zu, ja sogar innerhalb der gleichen Tiergruppe sind sie nicht allgemein verbreitet. Alle Schirmquallen und Rippenquallen besitzen solche Organe; bei den Randquallen gibt es solche, die am Schirmrand Statolithenorgane tragen (die meisten Leptomedusen, Trachomedusen, Narcomedusen) und solche, die anstatt dessen einfachste Sehorgane am Scheibenrand besitzen, welche jene als Organe der Orientierung über die Körperhaltung ersetzen können. Bei den Plattwürmern und Würmern sind nur wenige Arten im Besitze von Statocysten: unter den Strudelwürmern einige Alloeocoelen, Rhabdocoelen (z. B. Catenula lemnae) und alle Acoelen, unter den Nemertinen nur Ototyphlonemertes, unter den Nematoden eine Anzahl schlammbewohnender Formen des Meeres, unter den Ringelwürmern Röhren- und Sandbewohner aus den Familien der Ariciden (wenige), Arenicoliden, Terebelliden (wenige) und Sabelliden, also Formen, die nicht durch engere Verwandtschaft verknüpft sind. Von Stachelhäutern sind nur die Seeigel und die Synapten damit ausgestattet. Unter den Krebsen haben wenige Copepoden, einige Amphipoden (Gammariden aus der Gattung Ampelisca u. a., einige Platysceliden) und Isopoden (Anthura, einige Höhlenasseln und andere mit wenig entwickelten Augen) Statocysten, ferner viele Schizopoden und alle Decapoden — doch fehlt den Krabben (Brachyuren) in der Statocyste der Statolith, während ihre Zoëalarven einen solchen besitzen. Im Reich der Insekten kommen nur bei den Blattläusen Chermes und Phylloxera Sinnesorgane vor, die als statische gedeutet werden können. Von Tunicaten sind nur Doliolum und die kräftigen Schwimmer, die Appendicularien und die Ascidienlarven, im Besitz solcher Organe. Bei den Mollusken (außer den Amphineuren) und den Wirbeltieren (außer Amphioxus) sind Statolithenapparate ganz allgemein verbreitet.

Es liegt nahe zu fragen, was für Gemeinsamkeiten in der Lebensweise denjenigen Formen zukommen, die einen Statolithenapparat besitzen, und wie es kommt, daß ein solcher nicht überall vorkommt. Die Orientierung der Tiere über ihre Körperhaltung geschieht nicht bloß durch den Statolithenapparat, sondern zugleich durch ihre Tast- und Sehorgane. Ein Tintenfisch, dem die Statocysten zerstört sind, zeigt keine Störungen, solange er mit dem Boden in Berührung bleibt; er vermag auch in richtiger Haltung frei im Wasser zu schwimmen, solange er sich mit Hilfe seiner Augen orientieren kann; wenn man ihn aber blendet, so dreht er sich beim Schwimmen um seine Längsachse oder schwimmt mit dem Rücken nach unten und nimmt die richtige Haltung erst wieder an, wenn er auf dem Boden ruht, wo die eine Seite des Körpers mit dem Boden, die andere mit Wasser in Berührung ist, während beim Schwimmen die Haut allseitig von Wasser bespült und ihr so eine Unterscheidung von oben und unten unmöglich ist. Ebenso vermögen Taubstumme, bei denen oft das ganze Labyrinth, nicht bloß das Gehörorgan außer Funktion gesetzt ist, sich für gewöhnlich sehr gut zu orientieren; aber im Wasser untergetaucht, verlieren sie leicht die Möglichkeit oben und unten zu unterscheiden und kommen in Gefahr des Ertrinkens. Der Gesichtssinn ist bei Nacht und für Tiere, die im Boden wühlen, für die Orientierung ausgeschaltet; der Tastsinn ist ausgeschaltet für Tiere, die auf allen Seiten des Körpers von gleichartigem Stoff umgeben sind, so bei Schwimmern, bei Sandwühlern und bei Bewohnern völlig verschließbarer Gehäuse. So ist es vielleicht zu erklären, daß gerade bei solchen Tieren Statolithenorgane besonders häufig vorkommen, z. B. bei den Medusen und Rippenquallen, den Fischen und vielen Krebsen als Schwimmern, ferner bei bestimmten Strudelwürmern und dem Sandwurm (Arenicola), vielen schlammbewohnenden Nematoden und der im Schlamm wühlenden Holothurie Synapta und den oft grabenden Seeigeln, und schließlich bei Röhrenwürmern,

Schnecken und Muscheln. Eine eingezogene Kiemenschnecke, die ihr Haus mit dem Deckel verschlossen hat, oder eine Muschel, die die Schalen geschlossen hat, wird sich nur mit Hilfe der Statolithenorgane darüber orientieren können, welche Lageveränderungen mit ihr vorgehen. Von den Fischen haben auch luftbewohnende Wirbeltiere diese Organe übernommen, doch hat keines unter ihnen in seinem Labyrinth so mächtig ausgebildete Statolithen wie die Fische; von den schalentragenden Mollusken haben die Nacktschnecken und die nackten Tintenfische die Statocyste geerbt.

Allerdings gibt es gar manche in der angegebenen Weise lebende Formen, denen solche Organe fehlen oder bei denen sie doch bisher nicht gefunden wurden, so die Regenwürmer und die im Sande grabenden Seesterne. Bei ihnen mag auf andere Weise eine Orientierung zur Schwerkraft stattfinden, etwa durch den Druck des schweren Darminhalts auf empfindliche Teile der Körperwand.

Es ist aber auch nicht ausgeschlossen, daß ähnlich funktionierende Organe von prinzipiell anderem Bau vorkommen. Solche glaubt Rauther bei Mermis gefunden zu haben, einem Nematoden, der einen Teil seines Lebens im Boden zubringt und zur Eiablage an die Oberfläche kommt; Rauther erblickt statische Organe in den Kanalfasern des Vorderendes, die mit ihren Enden einerseits an der Kutikularoberfläche, andererseits an den hypodermalen Seitenwülsten befestigt sind und, mit einer dicken Umhüllung versehen, durch einen Kutikularkanal hinziehen. Die Fasern verlaufen zwischen den beiden Aufhängepunkten frei, nur von Flüssigkeit umspült, und müssen nach Rauthers Meinung bei Lageveränderungen des Tieres gereizt werden, wohl indem die Seite, nach der sie, dem Zuge der Schwerkraft folgend, sich etwas durchbiegen, dabei verändert wird.

3. Organe des thermischen Sinnes. Ueber den thermischen Sinn liegen uns nur für den Menschen zusammenhängende Untersuchungen vor. Man hat zwar für eine Anzahl wirbelloser Tiere festgestellt, daß sie auf Temperaturunterschiede reagieren, z. B. für die Küchenschabe; aber die Versuche sind nicht so eingehend, daß man daraus einen Schluß auf die rezipierenden Organe ziehen könnte. Dagegen ist beim Menschen festgestellt, daß die durch niedere oder hohe Temperatur erregbaren Stellen eine unveränderliche Lage auf der Haut haben, daß besondere Kalt- und Warmpunkte unterschieden werden müssen, daß erstere zahlreicher sind (an der Beugeseite des Unterarms auf 1 qcm 4 bis 12 Kaltpunkte, 1 bis 2 Warmpunkte; am ganzen Körper 200000 bis 300000 Kaltpunkte, 30000 Warmpunkte) und daß die Kältenerven wahrscheinlich näher an der Oberfläche endigen als die Wärmenerven. Nur Kaltpunkte, keine Warmpunkte sind an der Binde- und Hornhaut des Auges, an der Brustwarze, den äußeren Geschlechtsteilen und dem After vorhanden; v. Frey gründet auf solche statistischen Anhaltspunkte die Vermutung, daß die Endkolben der Hornhaut (Fig. 36) und ähnlich gebaute Nervenknäuel der Genitalien die rezipierenden Organe für Kältereiz sind, während die sogenannten Ruffinischen Endigungen möglicherweise durch Wärme gereizt werden.



Fig. 36. Endkolben aus der Hornhaut des Kalbs. af Achsenfaser des Nerven, bg Blutgefäß, h Hülle, k Innenkolben, mnf markhaltige Nervenfaser. Aus Stoehr.

4. Organe des chemischen Sinnes. Geschmack und Geruch werden hier als chemischer Sinn zusammengefaßt. Denn diese Unterscheidung gilt wohl für den Menschen und viele andere Tiere, die ein besonderes Organ für die Reizung durch flüssige chemische Stoffe, ein anderes für die Reizung durch gasförmige chemische Stoffe besitzen. Aber das ist nicht überall so. Einerseits fallen für die Wassertiere gasförmige chemische Stoffe als Reize im allgemeinen fort, bei ihnen würden wir also nur Geschmackssinn zu erwarten haben. Aber auch bei manchen Lufttieren, z. B. dem Regenwurm, werden die gleichen Organe sowohl durch gelöste wie durch gasförmige Stoffe gereizt, so daß auch für sie nur ein einheitlicher chemischer Sinn vorhanden ist. Jene Differenzierung des chemischen Sinnes besteht nur für die luftlebenden Wirbeltiere und wahrscheinlich für die luftlebenden Arthropoden, die Tausendfüßer, Insekten und Spinnentiere

Die Organe des chemischen Sinnes sind alle darin untereinander gleich, daß ihre Zellen mit lebendem Protoplasma an die Oberfläche reichen; eine Lagerung der ganzen Sinneszelle in der Tiefe der Haut oder eine Ueberdeckung mit Cuticula ist nicht angängig. Eine Fernwirkung, eine Uebertragung in die Tiefe wie bei Druckreizen ist eben bei chemischen Reizen nicht möglich; müßten die chemischen Substanzen zu einem tiefer gelegenen Sinnesorgan durchdringen, so könnten sie unter Umständen schon großen Schaden angerichtet haben, ehe sie das Rezeptionsorgan erreicht hätten. So tragen denn die Zellen des chemischen Sinnes in vielen Fällen ein über die Oberfläche vor-

stehendes plasmatisches Sinneshärchen; mindestens aber sind die rezipierenden Teile stets an die Oberfläche grenzende Zellen, mögen es nun primäre oder sekundäre Sinneszellen sein; freie Nervenendigungen als Organe des chemischen Sinnes sind bisher nicht bekannt. Das Herantreten des lebenden Protoplasmas an die Oberfläche macht bei den Lufttieren, vor allem bei den Bewohnern trockener Luft, besondere Einrichtungen notwendig, um ein Vertrocknen der Sinneshärchen zu verhindern: entweder ist die an die Luft grenzende Oberfläche der Sinneszellen sehr klein und vielleicht von einer dünnen Chitinlage überdeckt wie bei den Luftarthropoden, oder es werden, wie bei den Luftwirbeltieren, die Sinnesepithelien in Gruben und Vertiefungen des Körpers verlegt, die Mundhöhle und Nasenhöhle, wo sie außerdem reichlich von Drüsensekret berieselt und so vor dem Austrocknen geschützt werden.

Bei vielen niederen Wirbellosen stehen die Sinneszellen, welche chemische Reize rezipieren, einzeln über den Körper verstreut, wobei bestimmte Gegenden bevorzugt werden, wie bei den Aktinien die Fangarme, während auf der Mundscheibe chemische Reizbarkeit fehlt. So ist es bei vielen Cölenteraten, Stachelhäutern, Plattwürmern und selbst manchen Ringelwürmern. Daneben sind bei manchen Formen die Zellen des chemischen Sinnes zu Gruppen angeordnet, sogenannten Sinnesknospen oder Schmeckknospen (Fig. 37), z. B. bei den Synaptiden an der Innenseite der Mundtentakel; als solche Gruppen sind wohl auch die Wimpergrübchen der Strudelwürmer und die Cerebralorgane der Nemertinen aufzufassen. Auf den Rüsselpapillen der polychäten Ringelwürmer stehen bei manchen Arten (Nephthys, Phyllodoce) solche Sinneszellen diffus, bei anderen (Glycera, Goniada) nur in Knospen.

Die Organe des chemischen Sinnes sind bei den Ringelwürmern über die ganze äußere Haut und die Auskleidung der Mundhöhle verbreitet. Bei Nereis zählte F. Langdon auf dem Peristom 3600, auf dem 1. Segment 2000, auf dem 41. Segment 1100 Sinnesknospen. Bei einem großen Regenwurm (Lumbricus agricola) von etwa 19 cm Länge mit 153 Segmenten, berechnet sie 150000 Knospen für die ganze Oberfläche, wovon auf das 1. Segment mit dem Peristom 1900, auf das 56. Segment 700 kommen. Der Regenwurm ist am ganzen Körper durch Chininlösung reizbar; aber eine Lösung, die in den mittleren Körpersegmenten nicht mehr wirksam ist, reizt noch am Hinterende, und bei weiterer Verdünnung noch am Vorderende.

Bei Mollusken finden sich neben diffus verteilten Sinneszellen, auch besondere Anhäufungen von solchen. Patella ist an der ganzen Kiemenregion und fast auf der gesamten Haut chemisch reizbar; aber am größten ist die Reizbarkeit an den Tentakeln. Auch bei unseren Lungenschnecken stehen die Organe des chemischen Sinnes am dichtesten auf dem augentragenden Fühler und sind hier sowohl durch gasförmige wie durch flüssige Reize erregbar. Bei Tintenfischen liegen besondere Organe des chemischen Sinnes in der Mitte zwischen Augen und Trichter in Gestalt von Gruben, in denen die Sinneszellen zwischen Flimmerzellen liegen, deren Schlag für eine stete Zufuhr von frischem Wasser sorgt; ein Octopus mit ausgeschaltetem Gesichtssinn,

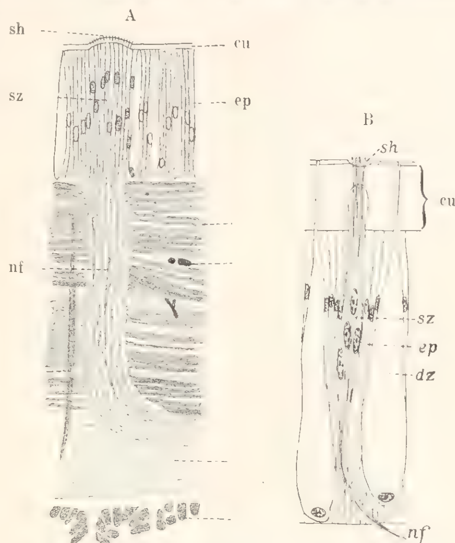


Fig. 37. Sinnesknospen von einem Regenwurm (A) und einem Meeresringelwurm (Nereis, B). cu Cuticula, dz Drüsenzelle, ep Epithelzelle, nf Nervenfasern, sh Sinneshaare, sz Sinneszelle. A nach Hesse. Aus Schneider. B nach Langdon.

dem in einer Entfernung von 1,5 m ein toter Fisch ins Becken gelegt wird, läßt schon nach einer Viertelminute erkennen, daß seine Spürorgane gereizt sind.

Hoch ausgebildet sind die chemischen Sinnesorgane bei den Arthropoden. Bei den Krebsen aller Gruppen sind es sogenannte hyaline Schläuche, die als Organe des chemischen Sinnes dienen; es sind umgewandelte Borsten, bei denen meist der äußere Abschnitt dünnwandig ist und auf einem dickwandigeren Sockel steht. Eine verschieden große Anzahl Sinneszellen, bei höheren Krebsen mehr als bei niederen, reichen mit ihren peripheren Enden in den Endschlauch hinein. Die Schläuche stehen auf den vorderen Antennen oft in reicher Entfaltung, bei den Männchen nicht selten zahlreicher als bei den Weibchen, so bei Daphnia, bei Leptodora (♂ 70, ♀ 9 Schmeckschläuche), bei Nebalia u. a. Auch die Antennen der blinden Tiefseedecapoden sind in der Regel reicher mit Witterungsorganen ausgestattet als die ihrer Verwandten im Oberflächenwasser: bei Plesionica cottei z. B. stehen auf dem Außenast der vorderen Antenne gegen 1500 Schmeckschläuche. Auch die aasfressenden Paguriden sind sehr reichlich mit Spürhaaren auf ihren Antennen versehen.

Bei den luftlebenden Arthropoden sind die Organe des chemischen Sinnes insofern abweichend gebaut, als ihr dünnhäutiger Teil, der ein leichtes Durchdiffundieren des chemischen Reizstoffes gestattet, von sehr beschränkter Ausdehnung ist: er nimmt nur die schmale, abgestumpfte Spitze eines Hohlkegels ein. Diese Kegel, gleichsam verkürzte Borsten, sind verschieden hoch, zuweilen in Gruben des Chitins eingesenkt (Grubenkegel), bisweilen ganz verschwunden, so daß nur noch ein von einem dünnen Chitinhäutchen überdeckter Porus übrig bleibt, der mit anderen seiner Art zu sogenannten Porenplatten vereinigt ist (Fig. 38). Manche Untersucher nehmen an, daß ein Chitinhäutchen an der Spitze des Kegels ganz fehlt, die Enden der Sinneszellen also hier freiliegen. Die Organe, die durch flüssige Reizstoffe erregt werden, wie es ja von denen in der Mundhöhle vieler Insekten ihrer Lage nach vorausgesetzt werden kann, sind ihrem Bau nach von den Riechkegeln kaum zu unterscheiden. Grubenkegel und Porenplatten allerdings kommen nur auf den Antennen vor und sind wohl stets Riechorgane. Die Lage auf den Tastern der Mittel- und Hinterkiefer spricht an sich noch nicht für Schmeckorgane; so sind z. B. bei manchen Käfern die Antennen und Mittelkiefertaster stellvertretend: bei zwei Arten der Käfergattung Hylecoetus (Fig. 39) hat die eine (1) einfache Antennen (a) und verästelte Mittelkiefertaster (b) mit großer Oberfläche und vielen Sinnesorganen, die andere (2) komplizierte Antennen und einfache Mittelkiefertaster, so daß man hier die Mittelkiefertaster ebenso wie die Antennen als Sitz von Riechorganen ansehen darf. Solche Oberflächenvergrößerung der Antennen als Vermehrung der Fläche für Sinnesorgane ist bei Insekten sehr häufig.

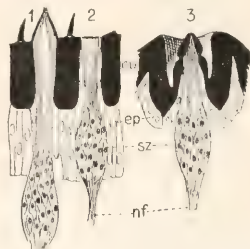


Fig. 38. Chemische Sinnesorgane von Arthropoden. 1 Riechkegel und 2 Porenplatte von einem Wespenfühler, 3 Grubenkegel (Geschmackskegel) von der Spitze des Gaumenzapfens beim Schwimmkäfer Dytiscus. cu Cuticula, ep Epidermis, sz Sinneszellen, nf Nervenfasern. Nach Kräpelin und Nagel.



Fig. 39. Fühler (a) und Maxillartaster (b) der Männchen von Hylecoetus dermestoides (1) und H. flabellicornis (2). Nach Germer.

Daß bei den Insekten in der Hauptsache die Antennen der Sitze des Riechvermögens sind, geht aus zahlreichen anatomischen Anhaltspunkten und physiologischen Versuchen hervor. Besonders wichtig ist u. a. die bedeutendere Größe und vermehrte Zahl von Sinneskegeln bei den Antennen der Männchen gegenüber denen der Weibchen bei den Spinnern und anderen Schmetterlingen, die ihre Weibchen nachweislich mit Hilfe ihres Riechvermögens auffinden. Auch die männlichen Maikäfer haben viel größere Fühler als die weiblichen; ein männlicher Fühler trägt hier über 50000, ein weiblicher nur gegen 8300 Einzelkegel. Im allgemeinen scheinen die

Riechorgane auf die Antennen und die Taster der Mittelkiefer, die Schmeckorgane auf die Mundhöhle und die Mundwerkzeuge (z. B. Schmetterlingsrüssel, Hinterkiefertaster der Schwimmkäferlarven) beschränkt zu sein. Nach Schön aber finden sich Riechkegel auch an den Vorderschienen der Ameisen, dicht unter dem Knie. — Die Lage der Riechkegel auf den Antennen ermöglicht es den Insekten, durch Bewegung dieser Anhänge für ständige Erneuerung der Riechluft zu sorgen. Gerade bei solchen Insekten, denen ihr Witterungsvermögen in hervorragendem Maße zur Orientierung dient, wie den Schlupfwespen und Wegwespen bei ihrer Beutesuche, sieht man die Fühler beständig in zitternder Bewegung.

Bei den Spinnentieren sind wohl die Pedipalpen als Hauptträger auch der Organe des chemischen Sinnes anzunehmen. Bei den Skorpionen aber beschreibt O. Schröder an den „Kämmen" auf der Ventralseite der Hinterleibsbasis einzellige Sinnesorgane, die durch ein feines Porenkanälchen der Cuticula frei nach außen münden und die sehr wahrscheinlich Rezeptoren für chemische Reize und zwar Riechorgane sind.

Bei den Wirbeltieren finden wir zwei örtlich scharf gesonderte und durch ihren histologischen Bau grundsätzlich verschiedene Organe des chemischen Sinnes, die bei den luftlebenden Wirbeltieren als Riech- und Schmeckorgane unterschieden werden können. Die ersteren enthalten primäre Sinneszellen, die ihren Nervenfortsatz direkt in den Riechlappen des Vorderhirns senden, wo sein Endbäumchen in die Bildung der Glomeruli olfactorii eingeht. Sie sind bei den Lufttieren so angebracht, daß sie in den Atemweg eingeschaltet sind und somit einerseits die Prüfung der Atemluft übernehmen, während zugleich durch den Atmungsmechanismus ein steter Luftwechsel in ihnen bewirkt wird. Bei allen Wirbeltieren sind sie auf die Nasenhöhle beschränkt. Dagegen bestehen die Schmeckorgane aus sekundären Sinneszellen, und es treten zu ihnen die Endbäumchen von Neuronen, deren Zellkörper in den Ganglien des 9. Gehirnnerven (Glossopharyngeus) gelegen sind. Sie finden sich bei den luftlebenden Wirbeltieren nur in der Schleimhaut der Mundhöhle und der benachbarten Organe; bei den Fischen aber sind sie mehr oder weniger weit über die Körperoberfläche verstreut.

Die adäquaten Reize sind bei den Lufttieren für die Sinnesorgane der Nasenhöhle gasförmige Reizstoffe, für die Sinnesorgane der Mundhöhle flüssige Stoffe, und wir können sie hier als Riech- und Schmeckorgane unterscheiden. Bei den Fischen sind es für beiderlei Sinnesorgane flüssige Reizstoffe, so daß wir jene Unterscheidung nicht mit Recht anwenden; aber sie sind nicht gleichbedeutend, sondern es ist zwischen ihnen eine Arbeitsteilung eingetreten: die einen sind Reizstoffen zugänglich, durch welche die anderen nicht erregt werden, und umgekehrt. v. Uexküll zeigte an Katzenhaien, daß sie durch die Extraktivstoffe von Sardinen schon bei sehr großer Verdünnung gereizt werden, wenn sie hungrig sind, daß aber nach Zerstörung der Nasenschleimhaut ein solcher Reiz nicht mehr eintritt. Dagegen werden von den Haien Sardinen, die mit Chinin bitter gemacht sind, aufgesucht, und erst wenn sie mit der Mundschleimhaut in Berührung kamen, wieder ausgespien, so daß also anzunehmen ist, daß der Bitterstoff erst auf die Schmeckorgane der Mundhöhle wirkte.

Die Nasengruben sind bei den Rundmäulern unter den Fischen unpaar, bei allen übrigen Wirbeltieren paarig.

Für den Wechsel des Wassers in den Nasengruben finden sich bei Fischen verschiedene Einrichtungen. Während diese bei den Cyklostomen blind geschlossen sind, schließt sich bei den Selachiern an die Nasengrube eine gegen den Mund zu verlaufende Furche an, die von einer Hautfalte überdeckt wird und bei manchen Formen bis zum Munde reicht (Fig. 40A), so daß der Strom des Atemwassers zugleich Wasser durch die Nasengruben saugt. Solche Kanäle zur Mundhöhle, Choanen, kommen auch den Lurchfischen (Dipnoern) zu. Bei den Ganoiden und Knochenfischen hat jede Nasengrube zwei Oeffnungen nach außen. Im einfachsten Falle, z. B. beim Karpfen, wird die doppelte Oeffnung durch eine Hautbrücke quer über die Nasengrube hergestellt; diese trägt nach vorn einen aufgerichteten Hautlappen (Fig. 40 B), der das entgegenströmende Wasser in die Nasengrube hinein ablenkt, aus der es durch die zweite Oeffnung entweicht; bei anderen Fischen, z. B. bei Polypterus oder beim Aal (Fig. 40C), sind die zwei Oeffnungen einer Nasengrube meist voneinander entfernt und die vordere ist in eine Röhre ausgezogen, deren Inneres bei Polypterus mit Flimmerepithel ausgekleidet ist, durch welches ein Strom von Wasser in die Grube hineingeleitet wird.

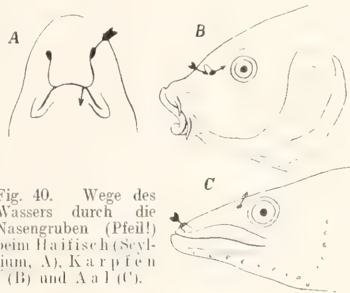


Fig. 40. Wege des Wassers durch die Nasengruben (Pfeil!) beim Haifisch (Scyllium, A), Karpfen (B) und Aal (C).

Die Oberfläche des Sinnesepithels ist bei den Fischen durch Faltenbildungen vergrößert. Bei manchen Haien, die sich ja bei der Nahrungssuche vorwiegend durch den chemischen Sinn leiten lassen, sind die Nasengruben geradezu von monströser Größe. Sehr stark ist das Sinnesorgan der Nase auch bei Polypterus und anderen Ganoiden ausgebildet, während die Knochenfische nur kleine Nasengruben und schwache Riechnerven haben, wie sie auch ihre Nahrung mit den Augen suchen. Die Nasenschleimhaut der Knochenfische besteht nicht aus einem einheitlichen Sinnesepithel, sondern die Sinneszellen sind zu zahlreichen Knospen gruppiert, welche durch Balken geschichteten Epithels getrennt sind, so daß sie äußerlich an die Geschmacksknospen (s. unten) erinnern; aber sie setzen sich ebenso wie das zusammenhängende Sinnesepithel der Nasenhöhle bei anderen Wirbeltieren aus primären Sinneszellen zusammen.

Bei allen luftatmenden Wirbeltieren steht, wie schon bei den Dipnoern, die Nasenhöhle durch die Choanen mit der Mundhöhle in Verbindung und ist zum Atemweg geworden. Die Oberfläche des Nasenraumes ist bei den Reptilien durch eine von vorn nach hinten verlaufende Hautfalte der äußeren Nasenhöhlenwand vergrößert, eine sogenannte Nasenmuschel, die durch Skelettelemente (Maxilloturbinale) eine Stütze erhält; sie trennt den Atemweg vom Riechraum. Dorsal von dieser Muschel erhebt sich bei Krokodilen und Vögeln noch ein Vorsprung, der Riechhügel, auf dem die Hauptmasse des Riechepithels gelegen ist. Bei manchen Vögeln gesellt sich dem unteren noch ein oberer Riechhügel zu. Beim Kiwi (Apteryx) sind die Muschelbildungen sehr kompliziert, indem noch eine untere und obere akzessorische Muschel hinzukommt; alle mit Ausnahme der letzteren sind mit Riechschleimhaut bedeckt, so daß dieser Vogel das am höchsten ausgebildete Riechorgan in der ganzen Klasse besitzt. Alle übrigen Wirbeltiere werden aber von den Säugern bei weitem übertroffen in der Ausbildung des Riechapparates. In dem vom Maxilloturbinale nach unten begrenzten oberen Nasenraum sind eine Anzahl parallel verlaufender Riechwülste vorhanden, deren oberster, das Nasoturbinale, sich am weitesten nach vorn erstreckt; sie reichen bis an die Schädelbasis, zum Teil bis in den Keilbeinsinus hinein. Durch Einrollung ist die Oberfläche der Riechwülste gesteigert, und wird noch vermehrt durch die Bildung von Nebenmuscheln (Fig. 41 A). Doch nicht bei allen Säugern ist das Riechvermögen in gleichem Maße entwickelt; bei manchen ist, im Zusammenhang mit der Lebensweise, der Riechapparat zurückgebildet. Das sind einerseits die Affen und der Mensch, deren Muscheln klein sind, geringe Oberflächenentfaltung aufweisen und nur teilweise mit Riechepithel bedeckt sind (Fig. 41 B), andererseits die Waltiere, bei denen die Nasenhöhle nur noch den Atemweg vorstellt, während der für Wasserbewohner überflüssige Riechapparat ganz geschwunden ist. Im Gegensatz zu den übrigen makrosmatischen Säugern werden die Primaten als mikrosmatisch, die Waltiere als anosmatisch bezeichnet.

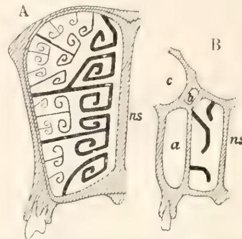


Fig. 41. Schematischer Querschnitt durch die Hälfte der Nasenhöhle bei einem makrosmatischen (A) und einem mikrosmatischen (B) Säuger. ns Nasenscheidewand, a b c Nebenhöhlen der Nase.

Das Riechepithel ist ein einschichtiges Epithel und besteht überall aus den Sinneszellen und dazwischen stehenden Stützzellen. Bei den Säugern (Fig. 42) haben die Riechzellen einen fadendünnen Zellkörper und ihre runden Kerne (zr) sind zu zahlreichen Lagen übereinander geschichtet, damit sie nebeneinander Platz finden; die ovalen Kerne der Stützzellen bilden die oberste Kernreihe (zo). Auf der Oberfläche der Riechschleimhaut münden zusammengesetzte

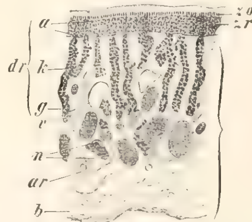


Fig. 42. Querschnitt durch die Riechschleimhaut des Menschen. zo, zr, dr vgl. Text; a Ausführgang, k Körper und g Grund der Drüse, ar, v Arterie, Vene, n Faserbündel des Riechnerven im Querschnitt, b Bindegewebe. Aus Stoehr.

Drüsen (dr), deren Hauptteil sich in das darunterliegende Bindegewebe erstreckt; ihr schleimhaltiges Sekret schützt das Riechepithel vor dem Vertrocknen. Wo das Epithel der Nasenschleimhaut keine Sinneszellen enthält (respiratorisches Epithel), ist es mehrschichtig.

Die Grundform, in der die Organe des Geschmackssinns bei den Wirbeltieren auftreten, ist die Geschmacksknospe. Sie besteht überall aus schlanken sekundären Sinneszellen, deren jede ein plasmatisches Schmeckhärchen trägt, und aus breiteren Stützzellen; die Endbäumchen der zugehörigen Nerven umspinnen die Knospe von außen, dringen zwischen ihre Zellen ein und bilden zuweilen (Fische) noch ein Geflecht an der Basis der Knospe, eine Cupula. Wo im geschichteten Epithel eine Geschmacksknospe liegt, bildet sie einen einschichtigen Bezirk; eine Papille der Lederhaut reicht bis an die Basis der Knospe und in ihr verlaufen auch die herantretenden Nervenfasern. Die Form der Knospen ist freilich verschieden: bei den Fischen (Fig. 43A) haben sie fast die Gestalt eines abgestumpften Kegels, dessen etwas abgerundete Basis der Lederhaut aufsitzt und dessen freies Ende in einer nur flachen Grube der Oberfläche liegt; beim Frosch sind es größere, flache Bezirke von Sinnesepithel („Endscheiben"); bei den Säugern (Fig. 43 C) sind die Geschmacksknospen tönnchenförmig und die Sinneshärchen stehen in einem grubenförmig versenkten engen Raum, der durch den „Geschmacksporus" nach außen mündet; eine wechselnde, zuweilen sehr eigenartige Gestalt haben sie bei den Vögeln (Fig. 43 B).

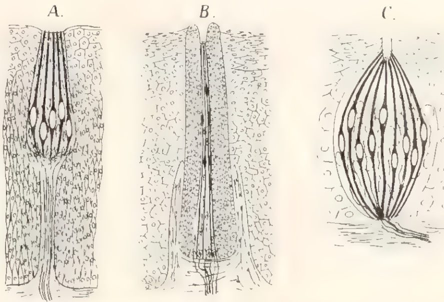


Fig. 43. Geschmacksknospen von einem Knochenfisch (Barbe, A), einem Vogel (Ente, B) und einem Säuger (C). Schematisch. Die Sinneszellen sind schwarz, die Stützzellen dazwischen hell.

Die Verteilung der Geschmacksknospen ist verschieden. Während sie bei luftatmenden Wirbeltieren auf die Mundhöhle beschränkt sind, kommen sie bei den Fischen, wo ja eine Gefahr des Vertrocknens nicht vorhanden ist, auch auf der äußeren Körperoberfläche vor, und zwar überall in der Umgebung des Mundes, an den Lippen und den Bartfäden, aber bei vielen auch an weiter rückwärts gelegenen Teilen; so konnte Nagel beim Hundshai (Scyllium) und dem Angler (Lophius) chemische Reizbarkeit auf der ganzen Oberfläche nachweisen. In der Mundhöhle der Fische sind sie überall zu finden, am Mundhöhlenboden wie am Dach, an den Kiemenbögen und bei den Cyprinoiden sogar im Kauapparat, daher im Schleimhautüberzug der sogenannten Schlundknochen. Bei den Amphibien kommen sie ebenfalls überall in der Mundhöhle vor, am Dach, am Boden und an der Zunge. Dagegen ist ihr Vorkommen bei Reptilien und Vögeln auf bestimmte Stellen der Mundhöhlenschleimhaut beschränkt, wo dieselbe weich und unverhornt ist, bei Eidechsen z. B. auf die Schleimhaut des Gaumens und die Falten des hinteren Zungenrückens, bei den Schildkröten auf die Zungenpapillen, bei den Krokodilen auf die unter den Pterygoidea gelegenen Bezirke des Mundhöhlendaches. Wechselnd ist ihre Lage bei den Vögeln (Fig. 44). Hier liegen sie niemals auf der Zunge; dort, wo die Schleimhaut des Unterschnabels von der Zunge nicht vollständig bedeckt ist, sind die unbedeckten Teile derselben Hauptsitz des Geschmacks (A); sonst finden sie sich an der Schleimhaut des Gaumens (C) oder am Schlundeingang um die Epiglottis (B).

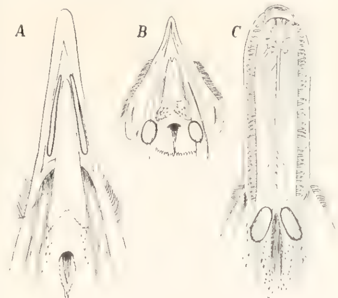


Fig. 44. Lage der Geschmacksknospen bei Vögeln. A im Unterschnabel bei der Amsel, B zu Seiten der Kehlritze bei der Rauchschwalbe, C im Mundhöhlendach zu Seiten der Choanen bei der Stockente; die Bezirke sind dick umrändert. Nach W. Bath.

Bei den Säugern sind im Zusammenhang mit der Kautätigkeit, welche die flüssigen Extraktivstoffe aus der Nahrung herauspreßt, die Geschmacksorgane weit höher entwickelt als bei den übrigen Wirbeltieren. Die Geschmacksknospen stehen hier hauptsächlich auf der Zunge, kommen aber auch am weichen Gaumen und auf dem Kehldeckel vor. Auf der Zunge finden sie sich auf der ganzen Fläche, sind aber am distalen Teil der Zunge in anderer Weise angebracht als am Zungengrunde (Fig. 45). Dort stehen sie auf kleinen Erhebungen der Schleimhaut, die als pilzhutförmige Papillen (P. fungiformes) bezeichnet werden, in wechselnder Anzahl: bei saugenden Kindern und Jungen von Tieren sind sie viel zahlreicher als bei den Erwachsenen (beim erwachsenen Menschen sind 20 % dieser Papillen ohne Geschmacksknospen, beim Säugling tragen sie ausnahmslos solche, manche in größerer Zahl), weil deren Nahrung an unmittelbar wirksamen Schmeckstoffen viel reicher ist. Am Zungengrunde dagegen sind die Geschmacksknospen in grubenförmigen Einsenkungen der Schleimhaut untergebracht, die entweder kreisförmig in sich zurücklaufen (sogenannte umwallte Papillen, P. circumvallatae), oder parallel nebeneinander herziehen (blättrige Papillen, P. foliatae; Fig. 46). Diese liegen in der Nachbarschaft der auspressenden Mahlzähne, und in den Gräben können sich die Schmeckstoffe sammeln und daher länger und intensiver auf die Geschmacksknospen einwirken. Die Entfernung der Schmeckstoffe aus den Gräben wird einerseits durch die Zungenbewegungen bewirkt, andererseits durch das eiweißhaltige Sekret von Drüsen, die in der Tiefe der Gräben münden (Fig. 46). In diesen Papillen stehen eine große Menge von Geschmacksknospen beisammen, z. B. in einer mittelgroßen umwallten Papille beim Schaf 460, beim Rind 1760, beim Schwein 4760 Knospen; eine blätterige Papille des Kaninchens enthält etwa 7440 Knospen. Die umwallten Papillen wechseln in ihrer Zahl von 2 bis zu zahlreichen und sind meist in Form eines nach hinten offenen V angeordnet; die blätterigen Papillen sind, wo sie vorkommen (z. B. Primaten, Nager) stets in einem Paare vorhanden und stehen zu Seiten des Zungengrundes (Fig. 45). Daß die Kautätigkeit der Säuger in engstem Zusammenhang mit der hohen Ausbildung der Geschmacksorgane steht, zeigt sich auch darin, daß bei den Schlingern, welche die Nahrung kaum kauen, und bei den Wassersäugern die Schmeckorgane spärlich entwickelt sind: bei den Waltieren und den Dugongs ist die Zunge ganz glatt, die Ameisen- und Termitenfresser haben nur wenige umwallte Papillen und keine blätterigen; andererseits ist bei den stärksten Kauern, den Nagern und Wiederkäuern, die Zahl und Ausdehnung der Papillen am größten.



Fig. 45. Zunge des Stachelschweins (Hystrix). 1 Umwallte, 2 pilzhutförmige und 3 blättrige Papillen. Nach Münch.

5. Organe des optischen Sinnes, Sehorgane. Die Organe des optischen Sinnes als Photorezeptoren zu bezeichnen, ist zwar durchaus rationell; aber es gibt von vornherein der Darstellung eine gewisse Schwerfälligkeit. Es dürfte kaum zu Mißverständnissen Anlaß geben, wenn man sie Sehorgane nennt; nur muß man sich dabei bewußt bleiben, daß man das Wort Sehen dabei im weiteren Sinne anwendet als der gewöhnliche Sprachgebrauch, und dafür die Definition Max Schultzes zugrunde legen: „Sehen ist die Umwandlung derjenigen Bewegung, auf welcher das Licht beruht, in eine andere Bewegung, die wir Nervenleitung nennen.“ In diesem Sinne werden wir denn auch die Worte Sehzelle, Sehnerv brauchen und von Helldunkelsehen, Richtungssehen u. a. sprechen.

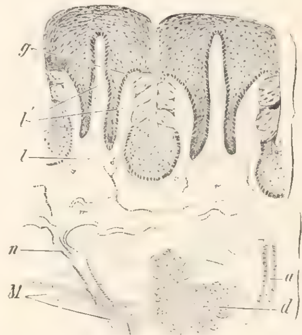


Fig. 46. Senkrechter Schnitt durch zwei Leisten der blätterigen Papille des Kaninchens. Die Bindegewebsleiste l trägt drei kleinere Leistchen l'; g Geschmacksknospen, n Nerven, M Muskelfasern der Zunge, d Eiweißdrüse und a Stück des Ausführgangs einer solchen. Aus Stoehr.

Wir können im Zusammenhang mit dem verschiedenen, mehr oder weniger komplizierten Bau der Sehorgane verschiedene Abstufungen des Sehens unterscheiden. Die einfachste Form ist nur eine verschiedene Reizung durch verschiedene Lichtintensitäten, wofür die Bezeichnung Helldunkelsehen angewendet werden soll; eine höhere Leistung ist das Richtungssehen, wobei der durch das Licht hervorgerufene Gesamtreiz verschieden ist je nach der Richtung, aus der das Licht kommt; von Bewegungssehen ist dann zu sprechen, wenn die Reize, die durch bewegte

Lichtpunkte ausgelöst werden, je nach der Richtung und Schnelligkeit der Bewegung erheblich verschieden sind; die höchste Leistung der Sehorgane ist das Bildsehen: es kommt in solchen Sehorganen zustande, wo je nach der Gestalt der lichtaussendenden Objekte die Kombination der hervorgerufenen Einzelreize verschieden ausfällt. Besondere Einrichtungen der Sehorgane sind erforderlich, wenn ein Entfernungssehen zustande kommen soll, d. h. wenn der Reizerfolg bei verschiedener Entfernung der Gegenstände sich merklich ändern soll.

Diese verschiedenen Abstufungen beruhen nicht auf Verschiedenheiten in den Leistungen der Sehzellen, sondern auf Hilfseinrichtungen, die eine Lichtsonderung ermöglichen und somit auf dem Aufbau des Sehorgans, auf der Anordnung seiner Teile. Das einfachste Mittel der Lichtsonderung ist dunkler Farbstoff, Pigment; er wirkt als Blendung, indem er nur die Lichtstrahlen aus bestimmten Richtungen zu den Sehzellen gelangen läßt, die aus anderen Richtungen aber fernhält. Das zweite Hilfsmittel der Lichtsonderung sind lichtbrechende Körper, die aber fast nur in Verbindung mit Pigment vorkommen, hauptsächlich Linsen, die ein Bild eines leuchtenden Punktes oder einer Gruppe von solchen auf ein Mosaik von Sehzellen entwerfen und durch Sammeln der Strahlen den Lichtreiz verstärken. Daher kann man aus dem Bau der Sinnesorgane Schlüsse darauf ziehen, zu welchen der bisher genannten Leistungen sie fähig erscheinen. Anders ist es mit dem Farbensehen. Dieses beruht auf der besonderen Beschaffenheit der Sehzellen, und es kann daher aus der Einrichtung der Organe über ihre Leistung nach dieser Richtung wenig oder gar nichts ausgesagt werden.

In allen mit Sicherheit bekannten Sehorganen sind die rezipierenden Teile primäre Sinneszellen; freie Nervenendigungen oder sekundäre Sinneszellen kommen für die Reizung durch Licht nach den bisherigen Erfahrungen nicht in Betracht. Die Sehzellen stammen überall, wo sich ein Nachweis über ihre Herkunft führen läßt, vom Ektoderm. Sie bewahren auch in vielen Fällen ihre Lage in der Epidermis, oder bei den Chordaten in dem durch Einstülpung des ektodermalen Epithels entstandenen Zentralnervensystem; in anderen Fällen aber sind sie aus der Epidermis ausgewandert und liegen mehr oder weniger weit von ihr entfernt. Die im Epithel verbleibenden Sehzellen behalten entweder ihre epitheliale Anordnung, d. h. sie reichen mit ihren freien Enden bis an die Oberfläche des einschichtigen Epithels wie die unveränderten Epithelzellen, oder sie liegen intraepithelial, zwischen den Epithelzellen, aber aus deren Verbande getrennt.

Es sind aber nicht die Sehzellen in ihrer gesamten Ausdehnung durch Licht reizbar, sondern es sind besondere Endapparate vorhanden, die bei vielen Sehzellen als Stäbchen, Zapfen, Rhabdomere gleichsam einen Anhang der Zelle bilden, bei anderen dagegen nicht ohne weiteres anatomisch von dem Zellkörper sich sondern lassen. Das wird ohne weiteres dort deutlich, wo die Körper der Sehzellen und ihre Nervenfortsätze außerhalb der Pigmentblendung gelegen und der Einwirkung des Lichtes ausgesetzt sind, während nur die „Stäbchen" optisch isoliert werden, wie z. B. bei dem Auge des Ringelwurms Alciopa (Fig. 57). Dieser lichtrezipierende Endpapparat zeigt aber bei sehr vielen Sehzellen in seinem Bau stets wiederkehrende Aehnlichkeiten, so daß es nahe liegt, nach einem gemeinsamen, für alle Sehzellen gültigen Bauplan zu suchen. In vielen Fällen und zwar bei Vertretern der verschiedenen Tierkreise (Plathelminthen, Würmer, Arthropoden, Mollusken, Amphioxus) zeigen die Sehzellen einen Besatz von Stiftchen, d. h. kleinen, im allgemeinen senkrecht zur Zelloberfläche dicht nebeneinander stehenden Faserbildungen, deren jedes sich in ein feines Fäserchen fortsetzt (Fig. 47); diese Fäserchen treten, eventuell miteinander anastomosierend und verschmelzend, in den Nervenfortsatz der Sehzelle ein und verlaufen in ihm weiter: sie verhalten sich ganz wie Neurofibrillen, und somit wären jene Stiftchen verdickte Neurofibrillenenden. Die Stiftchensäume liegen meist an der Oberfläche der Sehzelle, können aber auch in deren Innerem liegen, wie bei den Egeln oder bei Branchiomma (Fig. 50). Von den Sehzellen mit Stiftchensäumen aber finden sich Uebergänge zu solchen, bei denen die Zahl der verdickten Neurofibrillenenden eine geringere ist, wo nur ein Stiftchenbündel oder -pinsel, oder wo gar nur eine einzige verdickte Fibrille im rezipierenden Abschnitt vorhanden ist. Eine solche Reihe läßt sich besonders deutlich bei den Mollusken aufstellen, und die Figur 47 zeigt Sehzellen von Limax, Paludina und Pecten, in denen sich die fibrillären Grundlagen der „Stäbchen" in der angegebenen Weise zu Neurofibrillen fortsetzen. Ein Ueberblick über die Sehorgane, in denen solche Sehzellen vorkommen, läßt erkennen, daß die Zahl der Stiftchen bezw. der verdickten Neurofibrillenenden im allgemeinen im umgekehrten Verhältnis zur Zahl der in einem Sehorgan vereinigten Sehzellen steht: in den Augen der Opisthobranchier und Pulmonaten (Meeresnacktschnecken und Lungenschnecken) sind die Sehzellen mit Stiftchensäumen versehen, in den sehzellenreicheren

Augen der Vorderkiemer (Prosobranchiaten) finden wir Stiftchenpinsel, in den sehr sehzellenreichen Netzhäuten der Kammuscheln (Pecten) und Tintenfische sind die Stäbchen nur von je einem verdickten Neurofibrillenende durchzogen. Verminderung der Stiftchen in den Stiftchensäumen finden wir z. B. auch bei den Plattwürmern in der Reihe Planaria torva, Planaria gonocephala und Nemertinenauge. — In den Stäbchen und Zapfen der Sehzellen bei den Wirbeltieren sind bisher Gebilde, die als Fortsetzungen von Neurofibrillen anzusehen wären, von mancher Seite (Ritter, Krause, Hesse, K. C. Schneider) nachgewiesen, von anderen aber nicht bestätigt oder anders gedeutet worden. Damit würde sich eine große Gleichartigkeit im Aufbau der Sehzellen ergeben. Nur wenige Sehzellen sind es, die sich nicht einreihen lassen, vor allem diejenigen der Oligochäten (Nais, Regenwurm) und die der Salpen; bei diesen Tieren findet sich im Innern des Zellkörpers der Sehzelle (Fig. 48) ein Binnenkörper, ein sogenanntes Phaosom, von spezifischer Gestalt, den man vielleicht als wesentlich für die optische Reizbarkeit der Zelle ansehen darf. — Allerdings bedarf es noch mancher Untersuchungen, bis sich die hier dargelegte Auffassung allgemeiner Anerkennung erfreuen wird.



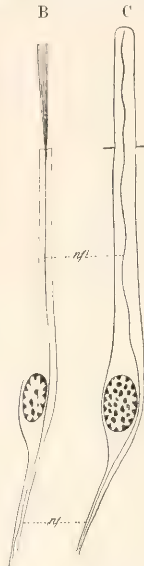


Fig. 47. Sehzellen von Limax (A), einer Kiemenschnecke (B) und Pecten (C). nf Nervenfortsatz, nfi Neurofibrille, k Kern.



Fig. 48. Intraepitheliale Sehzelle aus der Epidermis des Regenwurms.

Wie überall bei den Tastorganen und in manchen Fällen bei den Organen des chemischen Sinnes, so kommt auch bei den Sehorganen eine diffuse Verteilung der rezipierenden Zellen über die Körperoberfläche vor, aber nur bei wenigen Tieren. Bei dem im Meere lebenden, an Fischen, besonders Rochen, schmarotzenden Egel Pontobdella muricata finden sich die Sehzellen, die bei anderen Egeln in besonderen Pigmentbechern zu „Augen" vereinigt sind, einzeln verstreut über bestimmte Bezirke unter der Epidermis, so am Mundsaugnapf gegen 60 Zellen jederseits auf einem Raum von 1,2 mm Durchmesser, auch am Endsaugnapf finden sich solche; ob auch am übrigen Körper, bleibt noch zu untersuchen. Eine ähnliche diffuse Verteilung zeigen bei den Regenwürmern gewisse Sinneszellen, die zu der Deutung als Sehzellen berechtigen durch ihre Aehnlichkeit mit den Sehzellen der Egel, durch ihre Anordnung teils intraepithelial in der Epidermis, teils unter dieser, ja selbst im Cerebralganglion — wo man andere als lichtrezipierende Sinneszellen doch unmöglich annehmen kann — und durch die Uebereinstimmung ihrer Verteilung über den Wurmkörper mit der verschieden starken optischen Reizbarkeit der Abschnitte desselben: sie liegen besonders zahlreich im Prostomium und bei einigen Arten auch im Cerebralganglion; nicht selten sind sie auch im Epithel des letzten Segmentes; auf den übrigen Ringen sind sie sehr spärlich. Das Fehlen von Pigmentblendungen weist darauf hin, daß die Leistung dieser Sehorgane sich auf Helldunkelsehen beschränkt.

Bei den allermeisten Tieren aber kommen die Sehzellen stets mit Hilfseinrichtungen vor und bilden mit ihnen zusammengesetzte Organe. Diese sind verschieden in ihrem Aufbau sowie ihrer Fortbildungsweise und Fortbildungsfähigkeit, je nachdem die Sehzellen epithelial bleiben, oder aus dem Epithelverbande losgelöst intra- und subepithelial liegen. Die einfachsten unter den zusammengesetzten Sehorganen enthalten nur eine Sehzelle und eine oder einige pigmentierte Zellen, welche die Abblendung besorgen. Bei den intra- und subepithelialen Sehzellen ist die Anordnung dieser Bestandteile derart, daß die Pigmentzelle eine

becherartige Gestalt hat, und in diesem Becher die Sehzelle mit ihrem freien Ende steckt, während das Ende, das sich zur Nervenfaser auszieht, aus ihm hervorragt (Fig. 49);

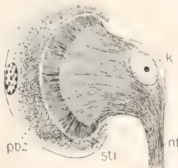


Fig. 49. Invertierter Pigmentbecherocell von Polycelis. Schematisch. K Kern der Sehzelle, nf Nervenfortsatz derselben, sti Stiftchensaum, pbz Pigmentbecherzelle.

der rezipierende Abschnitt der Sehzelle, der Stiftchensaum, liegt im Pigmentbecher. Ein solches Sehorgan bezeichnet man mit Beer als invertierten Pigmentbecherocell; sie kommen in dieser einfachen Form mit einer Sehzelle intraepithelial bei Capitelliden und im Rückenmark von Amphioxus, subepithelial bei vielen Strudelwürmern, z. B. den Polycelisarten unserer Bäche und Tümpel vor. Bei epithelialer Lage der Sehzelle gestaltet sich die Anordnung anders (Fig. 50): die Sehzelle wird von einem Pigmentmantel umgeben, der aus einer oder mehreren Epithelzellen besteht und, röhrenartig gestaltet, an seinem proximalen Ende eine Oeffnung für den Durchtritt des Nervenfortsatzes der Sehzelle läßt; die rezipierenden Teile liegen proximal in ihr, also in der Tiefe der Pigmentröhre. Diese Form möge epithelialer Pigmentbecherocell heißen; sie findet sich z. B. bei dem Ringelwurm Myxicola. Durch die Pigmentblendung wird bei diesen Organen ein Richtungssehen ermöglicht.



Fig. 50. Epithelialer Pigmentbecherocell aus dem zusammengesetzten Auge des Kiemenwurms Branchiomma. k Kern, pz Pigmentzelle, sti Stiftchensaum.

Solche einfachste Sehorgane können nun auf zweierlei Wegen zu höheren Leistungen kommen, entweder durch Vermehrung der Sehzellen in den Einzelorganen, oder durch Vermehrung der Einzelorgane selbst. Bei den invertierten Pigmentbecherocellen ist eine Vermehrung der Sehzellen bei Planaria torva auf 3, bei Dendrocoelum lacteum auf über 30, bei Planaria gonocephala (Fig. 51) auf über 150 eingetreten; die damit verbundene Vergrößerung des Pigmentbechers erfordert eine Zusammensetzung desselben aus zahlreichen Pigmentzellen. Eine Vermehrung der Einzelorgane ist bei den invertierten Pigmentbecherocellen sehr häufig; in manchen Fällen sind sie in der Zweizahl vorhanden; bei unseren Polycelis aber, bei vielen polycladen Strudelwürmern,

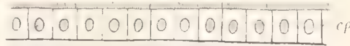


Fig. 51. Invertierter Pigmentbecherocell von Planaria gonocephala. Schematisch. ep Epidermis, pz Pigmentzelle, sz Sehzelle, die einen am Ende mit Stiftchensaum versehenen Kolben in den Pigmentbecher schickt.

bei Nemertinen, bei manchen Anneliden (Capitelliden), bei Amphioxus finden wir zahlreiche solche Pigmentbecherocelle, und zwar stets so angeordnet, daß die Achsen ihrer Pigmentbecher divergieren, so daß für jedes Einzelorgan die Richtung der Lichtstrahlen, die mit maximaler Reizung verbunden ist, eine besondere ist. Durch das Vorhandensein zahlreicher invertierter Pigmentbecherocelle mit divergierenden Achsen wird ein Bewegungssehen ermöglicht derart, daß ein bewegtes leuchtendes Objekt die Einzelorgane in verschiedener Reihenfolge erregt, je nach der Richtung seiner Bewegung. — Eine höhere Entwickelung, speziell eine Verbindung mit lichtbrechenden Apparaten, findet bei Sehorganen mit intra- oder subepithelialen Sehzellen nicht statt.

In ähnlicher Weise wie die invertierten können auch die epithelialen Pigmentbecherocelle gehäuft werden. Wir können das bei einer Reihe von Röhrenwürmern verfolgen, welche ihre Sehorgane auf den sogenannten Kiemen tragen: bei Hypsicomus stichophthalmus (Fig. 52 A) stehen auf jeder

Kieme zwei Reihen solcher Ocelle mit divergierenden Achsen, bei Protula (Fig. 52 B) sind eine Anzahl enger geschlossener Gruppen solcher Ocelle vorhanden, bei Sabella (Fig. 52C) schließen sich die Ocelle mit ihren Pigmenthüllen dicht zusammen, wobei die keilförmige Gestalt des Einzelocells eine regelmäßige Divergenz der Achsen bewirkt,

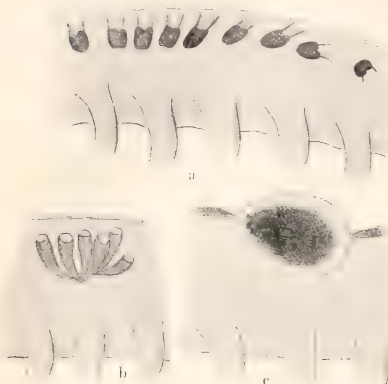


Fig. 52. Gruppen epithelialer Pigmentbecherocelle auf den Kiemen der Rohrenwürmer Hypsicomus (A), Protula (B) und Sabella (C).

und ebenso ist es bei Branchiomma (Fig. 53), nur daß die Zahl der vereinigten Ocelle hier sehr groß ist. Durch solch engen Zusammenschluß zahlreicher epithelialer Ocelle wird die Gesamtwirkung wesentlich erhöht, und wenn die einzelnen Sehfelder sich eng aneinanderschließen, kann es zu einem einfachsten Bildsehen kommen, indem die Kombination der Reize im Gesamtauge sich ändert je nach der Gestalt des Objekts und der verschieden starken Beleuchtung seiner Teile (Fig. 53). Aehnliche aus epithelialen Pigmentbecherocellen zusammengesetzte Sehorgane finden sich am Mantelrande der Muschelgattung Arca.

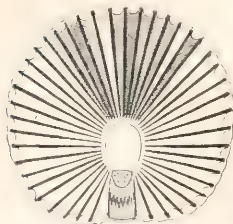


Fig. 53. Schematischer Querschnitt durch ein „Kiemenauge" (Gruppe epithelialer Pigmentbecherocelle) von Branchiomma, um die Wirkung eines in verschiedenen Teilen verschieden hell beleuchteten Gegenstandes deutlich zu machen: Bildsehen.

Die Vermehrung der Sehzellen in den epithelialen Sehorganen führt zur Bildung von Sehepithelien und damit zu einem neuen Ausgangspunkt für die Steigerung der Leistungen. Ein solches Sehepithel wird gewöhnlich, im Anschluß an die bei den Wirbeltieren übliche Benennung, als Netzhaut oder Retina bezeichnet. Das einfachste Sehepithel finden wir in den geschlechtsreifen Segmenten des Palolowurmes (Eunice viridis), deren jedes in der ventralen Mittellinie ein Sehorgan (Fig. 54) trägt. In diesem

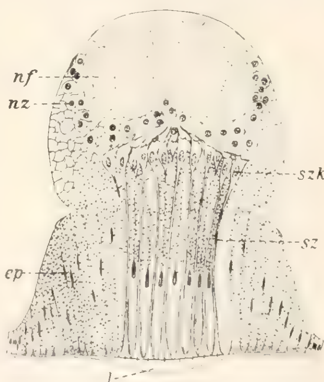


Fig. 54. Sehorgan von der Ventralseite der geschlechtsreifen Segmente des Palolowurms. sz Sehzellen, szk ihre Kerne; zwischen den Sehzellen und in ihrer Umgebung liegen verlängerte Epidermiszellen ep (Kerne ganz schwarz gezeichnet); die Nervenfortsätze der Sehzellen treten direkt in ein Ganglion des Bauchmarks (mit nf Nervenfilz und nz Nervenzellen) ein. Zwischen den Epidermiszellen Pigment, über den Sehzellen eine linsenförmige Verdickung l der Cuticula. Nach O. Schroder.

stehen Sehzellen und indifferente Epithelzellen (Stutzzellen) gemischt in einer ebenen Epithellage und werden von einem Pigmentmantel umgeben, der durch Pigmentansammlung in den benachbarten Epithelbezirken entstanden ist; gegen mechanische Reizung

werden die Sehzellen durch eine besonders dicke Cuticula geschützt, die das Sehorgan überzieht. Jede Sehzelle ist axial von einer gegen die Oberfläche dicker werdenden Neurofibrille durchzogen. — Meist aber ist das Pigment durch das ganze Sehepithel verbreitet, indem entweder die Sehzellen oder die Stützzellen oder beide pigmentiert sind. Durch grubenförmige Einsenkung des Sehepithels wird die Leistungsfähigkeit des Organs erhöht, indem dadurch ein Pigmentbecher entsteht, der das Licht aus manchen Richtungen ganz abhält, solches aus anderen Richtungen nur zu einem Teil der Sehzellen zuläßt, wobei nur das ganz oder nahezu parallel der Achse des Pigmentbechers einfallende Licht eine maximale Reizung hervorruft. Derartige Weiterentwickelung der Sehepithelien können wir in verschiedenen, voneinander unabhängigen Reihen verfolgen.

Sehr lehrreich liegen die Verhältnisse bei den Seesternen (Fig. 55). Sitz der Sehorgane sind hier die Augenpolster, von denen am Ende jedes Armes eines steht. Das einfachste Verhalten finden wir bei Astropecten mülleri und pentacanthus: über das ganze Augenpolster gleichmäßig verbreitet stehen zwischen indifferenten Epithelzellen (ep) die Sehzellen (sz), die gegenüber jenen ein wenig in die Tiefe gesunken und mit ihren freien Enden durch eine Grenzmembran (gm) verbunden sind, die der Cuticula parallel läuft (Fig. 55A); jede Sehzelle enthält einen roten körnigen Farbstoff, trägt ein über die Grenzmembran vorragendes stäbchenartiges Gebilde, dem die Rezeption des Lichtreizes zufällt, und setzt sich mit ihrem proximalen Ende in eine Nervenfaser (nf) fort, die in der Basis des Epithels zum Zentralorgan verläuft. Dieses zusammenhängende Sehepithel wird bei Luidia ciliaris an einzelnen Stellen mehr oder weniger tief eingestülpt, derart daß die Grenzmembran und mit ihr die Sehzellen sich von der Cuticula entfernen, während die indifferenten Epithelzellen ihre Lage beibehalten. Das leitet über zu einer zweiten Gruppe, wo auf den Augenpolstern nicht ein zusammenhängendes Sehepithel, sondern getrennte Sehgruben stehen, die durch Zusammendrängung und Einstülpung der Sehzellen innerhalb des Epithels entstanden sind; das Pigment der Sehzellen bildet jetzt einen Pigmentbecher, in dessen Innerem die Stäbchen liegen (Fig. 55B). Die Wirkung ist ähnlich wie bei den Pigmentbecherocellen: die Leistung des Sehapparates, die in der ersten Gruppe wenig über das Helldunkelsehen hinausgehen

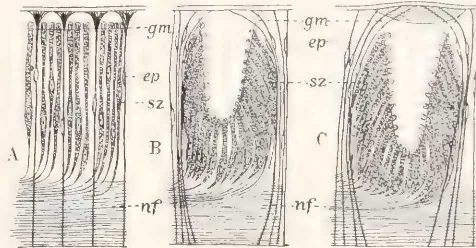


Fig. 55. Stücke von Querschnitten des Augenpolsters A von Astropecten mülleri, B von Astropecten aurantiacus, C von Asterias glacialis. Schematisiert nach Pfeffer. Buchstabenerklärung im Text.

konnte, ist zum Richtungssehen und, da zahlreiche solche Sehgruben auf dem Augenpolster stehen, zum Bewegungssehen gesteigert (z. B. Astropecten aurantiacus, Solaster papposus). Noch höher kann die Leistung dadurch werden, daß sich über jeder Sehgrube ein linsenartiges Gebilde unter der Cuticula entwickelt (Fig. 55C), wodurch die von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahlen gesammelt werden und so der Lichtreiz verstärkt wird (z. B. Asterias glacialis).

Streng morphologisch betrachtet sind die Sehzellen bei den Seesternen nicht epithelial, sondern intraepithelial angeordnet; sie bilden gleichsam ein Epithel im Epithel, man konnte es ein Schaltepithel nennen. Doch sind diese Sehorgane in ihrem ganzen Verhalten den Sehepithelien so ähnlich, daß sie sich hier am ungezwungensten einreihen lassen.

Anders als bei den Seesternen ist das Sehepithel bei den Ringelwürmern und Mollusken beschaffen. Hier erstrecken sich die Sehzellen mit ihrem distalen Ende bis zur Oberfläche des Epithels und tragen ein „Stäbchen", das diese Oberfläche überragt. Bei den Seesternen sind die Stäbchen der Sehzellen durch die Cuticula vor mechanischen und chemischen Reizen geschützt; bei den offenen Sehgruben einer Schnecke, Patella (Fig. 58A), geschieht dieser Schutz durch eine übergelagerte Sekretmasse, die von den indifferenten Epithelzellen des Sehepithels, den Sekretzellen, abgesondert wird. Flache Sehepithelien, wie bei Eunice viridis (Fig. [illegible]), aber mit der eben besprochenen Beschaffenheit der Sehzellen kennen wir hier nicht. Ueberall treffen wir Einstülpungen des Epithels zu einer Grube, die sich dann zu

einer Blase schließt, und indem die Sekretmasse, die das Sehepithel deckt, bei geschlossener Blase diese als kugelige Masse erfüllt, kommt es zu primitivsten Linsenbildungen und schließlich zu hochausgebildeten Linsenaugen, indem sich in der Sekretmasse noch eine stärker lichtbrechende geschichtete Linsenkugel ausscheidet.

Eine solche Entwickelungsreihe wird in ihren verschiedenen Stufen illustriert bei den Anneliden (Fig. 56, A bis C, Fig. 57) durch

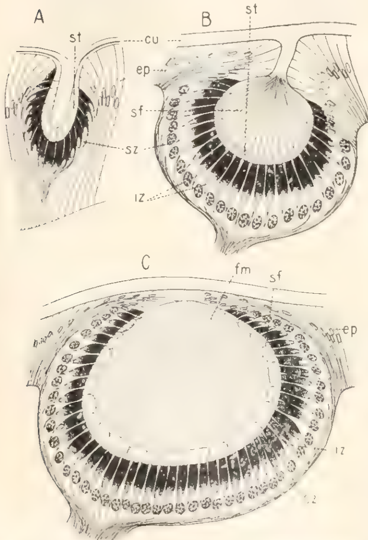


Fig. 56. Entwickelungsreihe der Annelidenaugen: Auge von Ranzania (A), Syllis (B) und Nereis (C). cu Cuticula, ep Epidermis, sz Sinneszellen mit den Stäbchen st, iz indifferente Epithelzellen, zugleich Sekretzellen, deren Sekretfäden sf die Füllmasse fm liefern.

die Sehorgane am Kopfe von Ranzania (A) oder Branchiomma (nicht zu verwechseln mit den Kiemenaugen dieses Wurmes), dann Syllis (B) oder Hesione, ferner mit ganz geschlossener Epithelblase Nereis (C) und schließlich durch das hochentwickelte große Auge der Alciopiden (Fig. 57). Bei den Mollusken wird unter den Kiemenschnecken eine der vorigen nahezu parallele Reihe dargestellt durch die Sehorgane von Patella, Haliotis, Murex (Fig. 58, A bis C). Stationen einer ähnlichen Entwickelung zeigen bei den Cephalopoden das Auge des altertümlichen, als letzter Rest eines ausgestorbenen Stammes übrig gebliebenen Nautilus, das in seinem Bauplan etwa dem von Haliotis (Fig. 58, B) entspricht, und das Auge der dibranchiaten Cephalopoden, der Tintenfische unserer Meere,

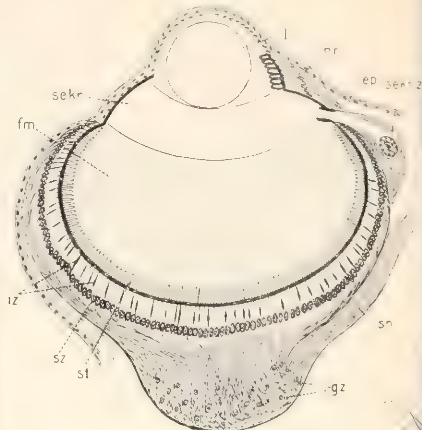


Fig. 57. Auge des Ringelwurms Alciopa. Bezeichnungen wie in Fig. 56; dazu l Linse, nr Nebenretina, sekr. z Sekretzelle, welche die Sekretmasse sekr liefert, gz Ganglienzellen, sn Sehnerv.

mit seiner überaus hohen Entwickelung. Bei diesem ist die Linse nach einem völlig anderen Prinzip gebaut (Fig. 59); sie füllt nicht den Hohlraum der Einstülpung, sondern entwickelt sich von den Epithelien an der Innen- und Außenfläche der Verschlußstelle: dementsprechend besteht sie aus zwei Abschnitten, die von einer Membran getrennt werden, einem inneren größeren und einem äußeren kleineren, die zusammen eine Kugel bilden. Die Epithelzellen ziehen sich zu Fasern aus, die den Linsenkörper zusammensetzen; rings um die Linse herum sind die Epithellager durch Faltungen vergrößert und bilden das sogenannte Corpus epitheliale, den Mutterboden, von dem das weitere Wachstum der Linse ausgeht, indem sich immer neue Fasern außen in der Art auflagern, daß die regelmäßige Kugelgestalt der Linse gewahrt bleibt.

In durchaus anderer Weise kommt es zur Bildung der Linse bei den Arthropodenaugen. Sie entsteht hier als Verdickung der Cuticula, die den Körper allenthalben überzieht. Verschieden ist aber das Verhältnis der Linsenbildungszellen zu den Sehzellen.

In sehr vielen Fällen stehen, wie bei den Anneliden und Mollusken, die Sehzellen

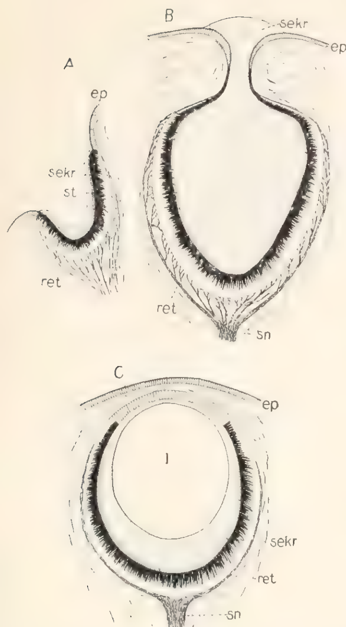


Fig. 58. Entwickelungsreihe der Schneckenaugen: Auge von Patella (A), Haliotis (B), Murex (C). Schematisch. ep Epidermis, ret Netzhaut, st Stäbchen, sekr Sekretmasse, sn Sehnerv, l Linse.

zwischen den indifferenten, die Linse bildenden Epithelzellen, und diese letzteren kommen zu engem Zusammenschluß dadurch, daß die Sehzellen zwischen ihnen in die Tiefe sinken. Durch diese Auswanderung der Sehzellen entsteht mehr oder weniger deutlich eine Zweischichtigkeit des Auges. Wir können eine Reihe von verschieden hoch ausgebildeten Zuständen von Arthropodenaugen, speziell von Stirnaugen der Insekten (Fig. 60, A bis D) zusammenstellen, welche Einzelstufen in diesem Entwickelungsgang darbieten, Stufen, die sich in der Einzelentwickelung der höchstausgebildeten Augenformen in gleicher Weise wiederholen. Die seitlichen Stirnocelle des Steinhüpfers (Machilis, Fig. 60, A), eines niederen Insektes, sind ebene, nichteingestülpte Sehepithelien, in denen Sehzellen und indifferente Epithelzellen (Corneagenzellen, cgz) nebeneinander stehen und deren Cuticularüberzug gegenüber den benachbarten Teilen der Cuticula nicht verdickt ist. Daran schließen sich die Ocelle mancher Heuschrecken (Fig. 60, B), bei denen die Cuticula zwar nicht verdickt, aber linsenartig vorgewölbt ist; die Sehzellen sind in die Tiefe gewandert und liegen ohne streng epitheliale Anordnung teils zwischen den basalen Enden der indifferenten Epithelzellen, teils unter diesen; eine scharfe Grenze zwischen Sehzellen und Epithelzellen ist nicht vorhanden; die letzteren sind sehr lang und bilden mit der vorgewölbten Cuticula einen einfachsten lichtbrechenden Apparat. In den Stirnaugen der Blattläuse

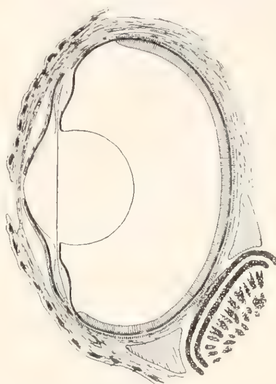


Fig. 59. Medianschnitt durch das Auge eines Tintenfisches (Sepiola). Von der zweiteiligen Linse nach oben und unten ist das Corpus epitheliale sichtbar; links von der Linse der Reihe nach Iris, Hornhaut, Augenlid; im Augenhintergrund die Netzhaut mit hohen Stäbchen, die oberhalb der Sehzellen von einer Pigmentlage durchzogen wird; rechts unten das Ganglion opticum; die von der Netzhaut kommenden Nervenfasern kreuzen sich vor Eintritt in dasselbe.

(Fig. 60, C) ist der Verband zwischen Sehzellen und Epithelzellen sogar noch enger als bei vorigen, diese reichen noch weiter zwischen die Sehzellen hinein; aber es ist hier zur Bildung einer deutlichen bikonvexen Linse durch Verdickung der Cuticula gekommen. Die Stirnaugen der Wespen (Fig. 60, D) schließlich zeigen uns den häufigsten Fall, daß nämlich die indifferenten Epithelzellen (cgz) und die Sinneszellen zu zwei völlig getrennten Schichten gesondert sind, deren erstere die Linse bildet und ihr ständig dicht anliegt. Die Embryonalentwickelung dieser Augen zeigt, daß die Schichtung in der Tat durch Auswanderung der Sehzellen aus dem ursprünglich einheitlichen Epithel zustande kommt.

Die Sonderung von Epithelzellen und Sehzellen kann aber auch noch in anderer Weise vor sich gehen. An einem Durchschnitt durch das Larvenauge des Schwimmkäfers Dytiscus (Fig. 61) läßt sich die Entwickelungsgeschichte desselben geradezu ablesen: ein zusammenhängendes Epithel ist eingestülpt, und der Boden der Einstülpung besteht nur aus Sehzellen; die über ihnen sich zusammenneigenden indifferenten Epithelzellen bilden die Linse. Nach diesem Schema sind vor allem die Augen der Tausendfüßer gebaut. In noch anderer Weise sondern sich die Zellen in manchen Augen der Spinnen, nämlich durch seitliche Einstülpung: der Vergleich der Figuren 62 und 63 zeigt das sehr deutlich; bei einem Medianauge der vorderen Reihe („Hauptaugen" A) geschieht die Sonderung der Corneagenschicht von der Sehzellenschicht anders, als bei den Medianaugen der hinteren Reihe und den Seiten-

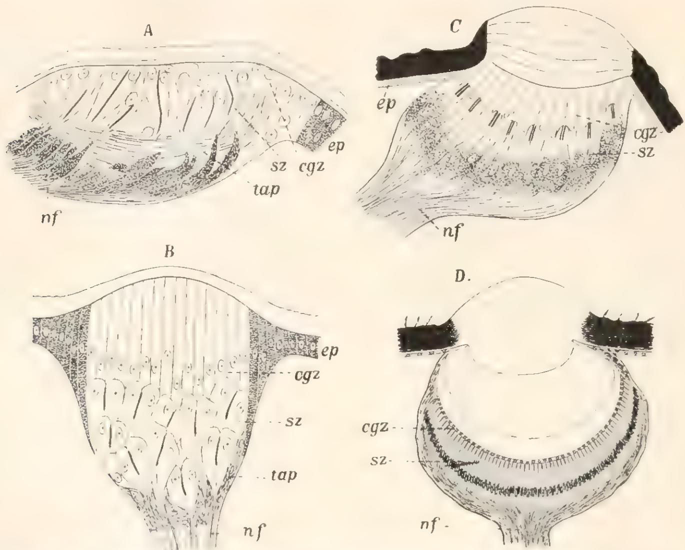


Fig. 60. Medianschnitte durch die Stirnaugen verschiedener Insekten. A von Machilis (seitliches Stirnauge), B von einer Feldheuschrecke (Psophus stridulus), C von einer Blattlaus (Pemphigus), D von einer Raubwespe (Crabro cribrarius). cgz Corneagenzellen, ep Epithel, nf Nervenfasern, sz Sehzellen, tap Tapetum. Nach Hesse (A), Link (B, C) und Grenacher (D).



Fig. 61. Schnitt durch das Auge einer jungen Käferlarve (Dytiscus). b Basalmembran, C Cuticula, cv eingestülpte Epithelzellen, e Epithel, l Linse, pg pigmenthaltige Zellen, sz Sehzellen. Nach Grenacher. Aus Hatschek.

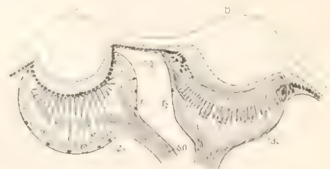


Fig. 62. „Haupt"-(A) und „Neben"-(B)Auge einer Spinne. cg Corneagenzellen, r_1, r_2 invertierte und nicht invertierte Netzhaut, sn Sehnerv, tap Tapetum, z_3 dritte Zellage (vgl. Fig. 63). Mit Benutzung der Figuren von Widmann.

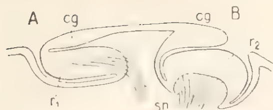


Fig. 63. Entwickelung der „Haupt"- und „Neben"-augen (A und B) der Spinnen; vgl. dazu Fig. 62, Bezeichnungen wie dort. Kombiniert nach Hentschel.

augen („Nebenaugen" B); die Sehzellschicht der ersteren wird dabei invertiert derart, daß die Nervenfasern nicht von dem proximalen Ende der Zellen entspringen; die Lage der rezipierenden Elemente jedoch ist durch die Inversion nicht beeinflußt.

Noch anders wird die Linse in den Augen mancher Muscheln gebildet. In den Augen am Mantelrand der Kammuschel (Pecten) besteht die Linse aus zahlreichen polyedrischen Zellen mit hellem Inhalt, die in Gestalt einer bikonvexen Linse zusammengeordnet sind und der äußeren Epidermis dicht anliegen (Fig. 64); die Wölbung der äußeren Linsen-

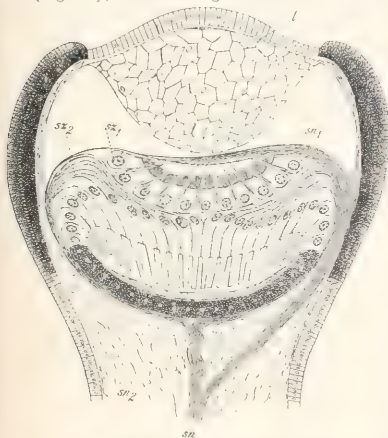


Fig. 64. Medianschnitt durch ein Auge vom Mantelrand der Kammuschel (Pecten). l Linse, sz_1 vordere Reihe Sehzellen mit dem von ihnen entspringenden Sehnervenbündel sn_1; sz_2 hintere Reihe Sehzellen mit zugehörigen Nervenfasern sn_2, sn Sehnerv. Hinter der Stäbchenlage von sz_2 ein Tapetum mit Tapetumzelle und dann eine Lage Pigmentzellen.

fläche wird bei manchen Pectenarten noch dadurch vermehrt, daß die Zellen der sie überziehenden Epidermis in der Mitte höher, oft in beträchtlichem Maße höher sind als an den Seiten. Es sind offenbar umgewandelte Bindegewebszellen, die hier zu Linsenzellen geworden sind. Ebenso ist es bei Spondylus und Cardium muticum.

Bei den Wirbeltieraugen legt sich die Linse als Epidermiseinstülpung an, und durch die Umgestaltung der Wände des abgeschnürten Epithelsäckchens bilden sich ihre Teile, wie weiter unten (S. 75) erörtert wird.

Somit sind bei zahlreichen Sehorganen auf ganz verschiedenem Wege, also unabhängig voneinander, Linsenbildungen entstanden. Das deutet auf die wichtige Rolle dieses Hilfsapparates für die Leistungen der Sehorgane hin. Die Bedeutung der Linse ist eine doppelte. Zunächst bewirkt sie eine Verstärkung des Lichtreizes, indem sie die auf ihre Außenfläche fallenden Strahlen sammelt. Indem aber durch eine Linse mit gewölbter Außenfläche die von einem leuchtenden Punkte ausgehenden Strahlen im allgemeinen auch wieder in einem Bildpunkte hinter der Linse gesammelt werden und daher die von den verschiedenen Punkten eines Objektes kommenden Strahlen gesondert in ebensovielen Punkten hinter der Linse zur Vereinigung gelangen, kommt es zur Entstehung eines Bildes hinter der Linse. Wenn eine genügend große Zahl von Sehzellen hinter der Linse flächenhaft angeordnet ist in der Weise, daß sich ihre lichtrezipierenden Enden in der gleichen Fläche befinden wie das von der Linse entworfene Bild, so werden die einzelnen Sehzellen in verschiedener Weise gereizt, entsprechend der verschiedenen Lichtstärke der auf sie fallenden Bildpunkte, und es wird die zustande kommende Reizkombination je nach der optischen Beschaffenheit der Objekte verschieden sein, d. h. das Sehorgan wird eine Unterscheidung der Objekte ermöglichen: wir haben ein Bildsehen. Nicht jedes Sehorgan mit Linse ist ohne weiteres zum Bildsehen geeignet; wenn wir z. B. bei manchen epithelialen Pigmentbecherocellen, die nur eine Sehzelle besitzen, eine linsenartige Bildung treffen (Fig. 50), so ist es klar, daß hier, wo nur eine Sehzelle erregt wird, an eine Unterscheidung verschiedener Objekte durch das Sehorgan nach ihrer Form und Helligkeitsverteilung nicht gedacht werden kann. Aber auch bei Linsenocellen mit etwas zahlreicheren Sehzellen wird man von einem Bildsehen noch nicht reden können: so nicht bei den Augen der Meeresnacktschnecke Pleurobranchus, die 8 bis 10 Sehzellen enthalten, oder bei den Sehorganen der Schmetterlingsraupen, in denen 7 Sehzellen vorhanden sind. Es ist unmöglich zu sagen, bei welcher Zahl von Sehzellen das Bildsehen anfängt. Wie es in unseren Augen Abstufungen gibt, je nachdem das Bild eines Gegenstandes mehr in der Peripherie der Netzhaut ent-

worfen wird, wo die Sehzellen weniger eng stehen, oder im gelben Fleck, wo sie dicht gedrängt sind, so kommen auch bei verschiedenen Tieraugen alle möglichen Abstufungen vor. Aber wenn auch nur wenige Sehzellen in einem Linsenocell vorhanden sind, so ist dessen Leistung damit doch gesteigert, durch Vervollkommnung des Richtungs- und Bewegungssehens; denn jeder Sehzelle ist eine bestimmte Richtung der sie treffenden Lichtstrahlen zugeordnet, der Linsenocell wirkt hier also wie so viele Pigmentbecherocelle mit divergenten Achsen, als Sehzellen im Linsenocell enthalten sind, wobei außerdem die Reizstärke infolge der Sammelwirkung der Linse bedeutend erhöht ist.

Das durch die Linse entworfene Bild liegt in verschiedener Entfernung hinter der Linse, je nach dem Abstande des leuchtenden Gegenstandes vor der Linse. Wenn der Gegenstand so weit von der Linse abliegt, daß die von einem Punkte ausgehenden Strahlen annähernd parallel auf die Vorderfläche der Linse fallen, liegt das Bild im Abstande des Brennpunktes der Linse hinter ihr; rückt der Gegenstand näher, so entfernt sich das Bild mit zunehmender Schnelligkeit es liegt gleichweit von der Linse ab wie der Gegenstand, wenn sich dieser auf doppelte Brennweite genähert hat; kommt der Gegenstand noch näher, so rückt das Bild sehr schnell weit ab. Da ein scharfes Bild nur dann rezipiert werden kann, wenn die rezipierenden Enden der Sehzellen in der Bildebene liegen, so ergibt sich daraus, daß für jedes Linsenauge eine bestimmte Zone vorhanden ist, in der die Gegenstände liegen müssen, damit ein scharfes Bild von ihnen auf der Netzhaut entsteht; eine Zone, nicht eine einzige Ebene, denn die lichtrezipierenden Elemente sind auch nicht auf eine Ebene beschränkt, sondern erstrecken sich mehr oder weniger in die Länge. Man sagt, das Auge ist für eine gewisse Entfernung eingestellt, und redet von einer zugeordneten Entfernungszone. Die Leistungsfähigkeit des Auges wird um ein Bedeutendes erhöht, wenn sich die zugeordnete Entfernungszone verschieben läßt, so daß Objekte aus wechselnden Entfernungen ein deutliches Bild auf der Netzhaut entwerfen können. Das Verschieben der einem Linsenauge zugeordneten Entfernungszone, sei es vom Auge fort oder zum Auge hin, wird als Akkommodation des Auges bezeichnet, und man unterscheidet eine Akkommodation für die Ferne und eine solche für die Nähe. Die Akkommodation kann auf doppelte Weise geschehen: entweder durch Aenderung des Abstandes von Linse und Netzhaut; wird dieser Abstand vergrößert, so tritt eine Akkommodation für die Nähe ein, wird er verringert, so ist das eine Akkommodation für die Ferne; oder die Akkommodation geschieht durch Aenderung der Linsenform und damit der Brechkraft der Linse: stärkere Wölbung der Linse erhöht ihre Brechkraft, bewirkt also Akkommodation für die Nähe, Abflachung der Linse dagegen bewirkt Akkommodation für die Ferne. Da die Muskeltätigkeiten, durch welche die Akkommodation bewirkt wird, unter Umständen mit Reizung von Organen des mechanischen Sinnes (Muskelspindeln oder dgl.) verknüpft sein können, ist damit die Möglichkeit eines Entfernungssehens, beruhend auf einem verschiedenen Reizzustande bei verschiedener Entfernung der Objekte, gegeben.

In der Reihe der wirbellosen Tiere ist nur eine Tiergruppe, für die eine Akkommodation des Auges experimentell nachgewiesen ist, das sind die Tintenfische. Aus dem anatomischen Bau ist die Möglichkeit einer Akkommodation als wahrscheinlich erschlossen bei den Alciopiden, bei der Kammuschel (Pecten) und manchen Spinnen. Bei den Wirbeltieren ist die Akkommodation sehr weit verbreitet, geschieht aber bei den verschiedenen Gruppen in verschiedener Weise. Bei den Tintenfischen wird nach den Untersuchungen von Heß durch Zusammenziehung von Muskeln auf der Oberfläche des Auges der Innendruck im Auge erhöht und dadurch die Linse von der Netzhaut abgedrängt und das in der Ruhe für die Ferne eingestellte Auge für nahe Gegenstände akkommodiert. Eine Annäherung der Linse an die Netzhaut hält Hesse für die wahrscheinliche Wirkung bei der Kontraktion der Muskeln, die in der distalen Augenwand, der Cornea und ihrer Umgebung, beim Alciopidenauge liegen; bei der Kammuschel dagegen müßte die Kontraktion der Muskeln, die der distalen Fläche der Linse aufliegen, eine stärkere Wölbung der Linse und des ihr anliegenden Epidermisabschnittes (der Cornea) bedingen und so durch Vermehrung der Brechkraft der Linse eine Akkommodation für die Nähe bewirken. Bei den Wirbeltieren akkommodieren Fische und Amphibien durch Verschiebung der Linse, jene für die Ferne, diese für die Nähe; Sauropsiden und Säuger dagegen akkommodieren durch stärkere Wölbung der Linse, also für die Nähe, doch auf verschiedene Weise, wie weiter unten (S. 79) gezeigt wird.

Dagegen gibt es bei einer Reihe von wirbellosen Tieren Einrichtungen derart, daß das Auge gleichzeitig für zwei verschiedene Entfernungen eingestellt ist. So finden wir sowohl bei den Augen am Mantelrande der Kammuschel (Fig. 64) wie bei den Stirnaugen der Libellen zwei Lagen von Sehzellen hintereinander, also in verschiedener Entfernung von der Linse; auf der distalen Sehzellenlage müssen also scharfe Bilder von fernen Gegenstanden entstehen, auf der proximalen

solche von näheren. Wenn zahlreichere Augen bei einem Tier vorhanden sind, kommt es zuweilen vor, daß die Sehzellen in den einen beträchtlich weiter von der Linse entfernt sind als in den anderen; es sind also jene für nähere, diese für fernere Objekte eingestellt. Diese Arbeitsteilung, welche wenigstens einigen Ersatz für die mangelnde Akkommodationsfähigkeit bietet, findet sich z. B. bei vielen Spinnen (Fig. 62), die ja im allgemeinen 3 bis 4 Paar Augen am Kopfe besitzen; auch die verschiedenen Ocelle am Kopfe der Dytiscuslarve sind in dieser Beziehung verschieden. Besonders interessant aber sind Augen, in denen der Abstand zwischen Linse und Netzhaut in verschiedenen Teilen verschieden ist, wie bei manchen Spinnenaugen, oder in den Stirnaugen mancher Fliegen, z. B. der Schwebfliegen (Fig. 65): im linken Teile der Figur liegen die

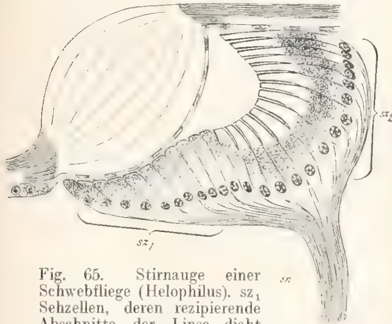


Fig. 65. Stirnauge einer Schwebfliege (Helophilus). sz_1 Sehzellen, deren rezipierende Abschnitte der Linse dicht anliegen, sz_2 solche, bei denen sie weit davon entfernt sind, sn Sehnerv.

rezipierenden Enden der Sehzellen dicht an der Linse, dieser Teil ist also für die Ferne eingestellt; im rechten Teil dagegen sind die Sehzellen durch einen Zwischenraum von der Linse getrennt und somit für nähere Gegenstände eingestellt; da beim Verschieben ferner Gegenstände sich das Bild im Verhältnis zur Linse nur wenig verschiebt, sind in jenem Abschnitt die rezipierenden Elemente (Stiftchensäume) ganz flach; die dem Naheauge zugeordnete Entfernungszone aber ist dadurch vergrößert, daß die rezipierenden Elemente eine große Tiefenausdehnung haben — denn bei Verschiebung naher Objekte verschiebt sich ihr Bild in viel höherem Maße.

In derselben Weise wie bei den Pigmentbecherocellen, wird auch bei den Linsenaugen ein Fortschritt in der Leistungsfähigkeit wiederum auf zwei verschiedenen Wegen erreicht, entweder durch Vermehrung der Einzelorgane, oder durch Vermehrung der Sehzellen in einem Sehorgan. Besonders innerhalb mancher Arthropodenklassen finden wir beide Wege nebeneinander eingeschlagen. Die Tausendfüße unserer Fauna z. B. haben zahlreiche, verhältnismäßig einfache und sehzellarme Linsenaugen, Lithobius z. B. jederseits gegen 30; dagegen haben die großen Scolopendraarten jederseits nur eines oder wenige Augen von bedeutendem Durchmesser und mit zahlreichen Sehzellen. Aehnliches finden wir bei Insektenlarven: während bei den Schmetterlingsraupen jederseits 5 bis 6 Linsenocelle mit je 7 Sehzellen vorkommen, haben die Larven der Blattwespen, die sogenannten Afterraupen, nur ein Auge jederseits, das aber viel größer und reicher an Sehzellen ist. Während durch die Häufung einfacherer kleiner Augen zunächst wohl besonders das Bewegungssehen befördert wird, ist die Vergrößerung der Einzelaugen für das Bildsehen von Wichtigkeit. Aber auch auf jenem Wege kann es zu einem Bildsehen kommen, wenn die Zahl der nebeneinander vorkommenden Augen sehr groß und ihr Verband besonders eng ist. Diese Bedingungen finden sich erfüllt in den zusammengesetzten Augen der Arthropoden.

Hier ist angenommen, daß in der Tat die zusammengesetzten Augen der Arthropoden durch Zusammentreten von Einzelaugen entstanden seien. Dieser von Joh. Müller stammenden Hypothese stellte Leydig die andere gegenüber, daß das zusammengesetzte Auge aus einem größeren Einzelauge in der Weise entstanden sei, daß die Cornea sich in Einzellinsen teilte, denen sich Sinneszellgruppen zuordneten. Diese Hypothese ist nicht schlechthin von der Hand zu weisen, da auch in vielen Einzelaugen die Sinneszellen in Gruppen zusammenstehen, innerhalb deren ihre rezipierenden Abschnitte engere Beziehungen zueinander haben (Fig. 60); man kann auch das Vorkommen eines Einzelauges mit fazettierter Cornea bei Osmylus (Link) dafür ins Feld führen. Wenn trotzdem hier die Anschauung Joh. Müllers für die wahrscheinlichere gehalten wird, so sind folgende Gründe dafür entscheidend: 1. bei Lepisma saccharinum stehen jederseits am Kopfe 12 Ocelle von der Beschaffenheit der Teilaugen des zusammengesetzten Auges, in lockerer Anordnung, durch einige Pigmentzellen getrennt, in diesen Ocellen stehen, abweichend von den meisten zusammengesetzten Augen und größeren Einzelaugen, die Sehzellen in zwei Schichten übereinander, wie das auch im zusammengesetzten Auge von Periplaneta der Fall ist. Es ist wahrscheinlich, daß gerade bei den niedersten Insekten die Auflösung und Umwandlung eines ursprünglich einheitlichen Auges am weitesten gegangen wäre. Viel einleuchtender ist es, daß der lockere Verband der Augen bei Lepisma und die Schichtung der Einzelretinae, ähnlich der in den Raupenocellen, ein ursprünglicher Zustand ist. 2. Unter den Tausendfüßern hat Scutigera als einzige Form ein zusammengesetztes Auge, aber mit ganz anderen Zahlenverhältnissen der Zellen als das der Insekten und Krebse; hier kann kein Zweifel sein; daß es durch enges Zusammentreten von zahlreichen Einzelaugen entstanden ist.

Die zusammengesetzten Augen (Facettenaugen, Komplexaugen) der Krebse und Insekten (Fig. 66) bestehen aus mehr oder weniger

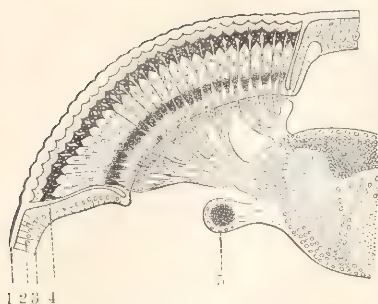


Fig. 66. Medianschnitt durch das Facettenauge eines Ohrwurms (Forficula) 1 Cuticula, 2 Epidermis, 3 Basalmembran, 4 einspringende Chitinlamelle, 5 rudimentäres Larvenauge. Nach Carrière. Aus Hatschek.

zahlreichen Einzelaugen (Facettengliedern, Ommen, Augenkeilen), deren jedes die Gestalt einer sechsseitigen, selten vierseitigen abgestumpften Pyramide mit nach außen gekehrter Basis hat, seinen eigenen lichtbrechenden Apparat besitzt und in der Regel von einem Pigmentmantel umgeben ist. Der morphologische Aufbau der Einzelaugen ist, was die Zahl der Zellen angeht, von einer außerordentlichen Gleichförmigkeit (Fig. 67 A bis D): der Regel nach sind 2 Corneagenzellen, 4 Kegelzellen und 8 Sehzellen vorhanden, Zahlen, die geradezu darauf hinweisen, daß diese Zellen das Teilungsprodukt gemeinsamer Mutterzellen sind. Allerdings kommen Ausnahmen vor: die Corneagenzellen sind zahlreicher bei den Phyllopoden, Kegelzellen sind nur zwei vorhanden bei vielen Ringelkrebsen (Porcellio, Gammarus, Hyperia u. a.) und die Zahl der Sehzellen ist vielfach auf 7 reduziert, bei manchen Asseln auf 14 vermehrt: aber in zahlreichen Fällen, wo 7 wohlausgebildete Sehzellen vorhanden sind, konnte eine 8. rudimentäre Sehzelle nachgewiesen werden, so bei Palaemon, manchen Käfern, Dipteren und Schmetterlingen; ganz vereinzelt steht die Vermehrung der Sehzellen auf 10 bei manchen Schmetterlingen (Lycaeniden u. a.). Gegenüber dieser großen Beständigkeit in der Zahl der Elemente des Auges ist es bemerkenswert, wie sehr die Zahl jener Zellen wechselt, die sich trennend zwischen die einzelnen Facettenglieder einschieben, der sogenannten Nebenpigmentzellen: bei manchen Nachtschmetterlingen sind es 6 entsprechend der sechskantigen Form des Fa-

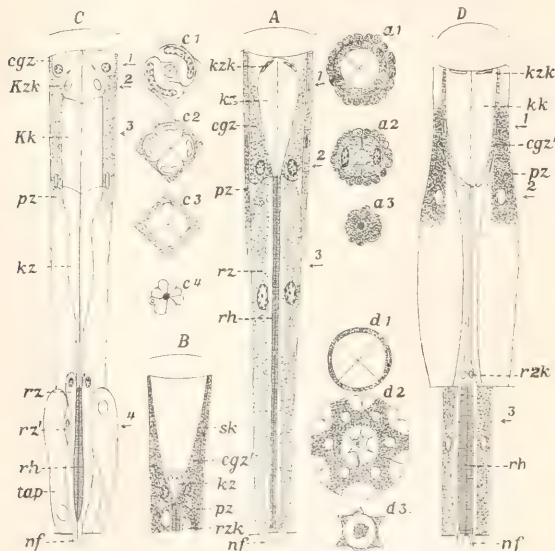


Fig. 67. Verschieden gebaute Facettenglieder von zusammengesetzten Arthropodenaugen. Im Längs- und Querschnitt. Schematisch (Längenausmaß bei den Längsschnitten nur etwa halb so sehr vergrößert als Querausmaß). A von einer Libelle (akon), B von einer Fliege (pseudokon), C von einem dekapoden Krebs (Palaemon) und D von einem Nachtfalter (eukon). cgz Corneagenzelle und cgz' solche, die nicht mehr mit der Cornealinse in voller Berührung stehen, kk Kristallkegel, kz Kegelzelle, kzk Kern der Kegelzelle, nf Nervenfaser, pz Pigmentzelle, rh Rhabdom, rz Retinulazelle = Sehzelle, rz' rudimentäre Retinulazelle, rzk Kern der Retinulazelle, sk Sekretkegel, tap Tapetum. Die Pfeile zeigen die Höhe der mit der gleichen Zahl versehenen gleichnamigen (bei A mit a, bei C mit c usw. bezeichneten) Querschnitte.

cettengliedes, wobei jede der 6 Zellen an drei Facettenglieder grenzt (Fig. 67, d2), dagegen kommen bei manchen Dipteren (z. B. Simulia) 48 Nebenpigmentzellen auf ein Facettenglied; dazwischen gibt es allerhand Abstufungen.

Die beiden Corneagenzellen (Fig. 67, cgz) scheiden die das Facettenglied außen überziehende Cuticula ab, die meist eine plankonvexe oder bikonvexe Linse (Cornealinse) bildet. Bei allen Formen, deren Facettenaugen eine Häutung, d. h. eine Erneuerung des Cuticularüberzugs durchmachen müssen, also bei allen Krebsen und den Insekten ohne oder mit unvollkommener Verwandlung, bleiben diese Zellen beständig mit der Linse in Zusammenhang. Bei den Insekten (Fig. 67, ABD) zieht sich ihr Zellkörper zu beiden Seiten der Kegelzellen herab und ist in diesem Abschnitt mit Pigment erfüllt; sie werden hier als Hauptpigmentzellen (Grenacher) bezeichnet. Bei den Insekten mit vollkommener Verwandlung, wo das Facettenauge erst vor der letzten Häutung, d. i. während des Puppenzustandes gebildet wird, werden die Corneagenzellen frühzeitig von der Cuticula getrennt und rücken ganz in die Umgebung der Kegelzellen. — Die Kegelzellen liegen in engem Zusammenschluß einander parallel um die Augenachse und bilden einen lichtbrechenden Körper, dem die Aufgabe zufällt, die Lichtstrahlen dem Rhabdom (rh), d. h. dem lichtrezipierenden Abschnitt der Sehzellen zuzuleiten. Sie können sich verschieden verhalten: entweder ist ihr ganzer Inhalt hell, durchsichtig, wasserreich, sie bilden einen Zellkegel (Fig. 67, A kz); oder innerhalb ihres Zelleibes ist eine cuticuläre Masse (kk) ausgeschieden, die diesen fast ganz erfüllt (D) oder nur einen Teil davon einnimmt (C), sie bilden einen Kristallkegel; oder sie sind verhältnismäßig klein und haben zwischen sich und der Cornealinse eine einheitliche Masse ausgeschieden, einen Sekretkegel oder Pseudoconus (B). Grenacher unterscheidet danach akone (mit Zellkegel), eukone (mit Kristallkegel) und pseudokone (mit Sekretkegel) Augen. — Die Sehzellen eines Facettengliedes werden als Retinula zusammengefaßt. Sie liegen um die Achse des Facettengliedes herum, gewöhnlich so, daß sie im Querschnitt eine regelmäßige Rosette bilden (Fig. 67, a3, c4), zuweilen (z. B. bei vielen Dipteren) steht eine Sehzelle axial und die anderen stehen um sie herum; seltener stehen sie in zwei Lagen übereinander, z. B. bei Lepisma, bei der Küchenschabe, bei Corixa. Jede Sehzelle trägt ihre lichtrezipierenden Teile an der der Achse zugekehrten Seite als ein stark lichtbrechendes, meist stabartiges Gebilde, das Rhabdomer; die 7 bis 8 Rhabdomeren bleiben zuweilen gesondert, meist aber sind sie zu einem axialen Stab, dem Rhabdom, verschmolzen. Die enge Nachbarschaft oder gar Verschmelzung der lichtrezipierenden Teile innerhalb der Retinula hat zur Folge, daß die Reizung für alle Sehzellen einer Retinula im wesentlichen gleich ist, daß also ein Bildsehen mit dem Einzelauge nicht möglich ist. In vielen Fällen, z. B. Apus, Flußkrebs, Küchenschabe, zeigt jedes Rhabdomer eine deutliche Zusammensetzung aus feinen Stiftchen und ist von Hesse als Stiftchensaum (s. oben S. 57) gedeutet, dessen einzelne Stiftchen sich in Neurofibrillen fortsetzen, die unter Anastomosen und Verschmelzungen in die Nervenfaser der Sehzelle übergehen; bei manchen zehnfüßigen Krebsen sind sogar die Stiftchensäume benachbarter Sehzellen ineinander verkeilt wie die Zähne zweier Zahnleisten, so daß eine Deutung als cuticulärer Saum ganz ausgeschlossen ist. Die Nervenfasern der Sehzellen durchsetzen die Basalmembran des Auges und treten in das distalste Sehganglion ein, wo sie endigen.

Die Pyramidenform der Facettenglieder bewirkt ein Zusammenstehen derart, daß ihre Achsen nach außen divergieren und sie auf einem Medianschnitt durch das Auge wie die Stäbe eines Fächers angeordnet scheinen. Der lichtbrechende Apparat jedes Facettengliedes ist so ausgebildet, daß nur die Strahlen, welche ganz oder nahezu parallel mit der Augenachse auf die Cornealinse fallen, zum Rhabdom gelangen; Strahlen dagegen, welche unter spitzerem Winkel auf sie fallen, werden so gebrochen, daß sie von dem die Kegelzellen umgebenden Pigment verschluckt werden. Wenn also alle Strahlen, die zum Rhabdom gelangen, aus einem Gebiet kommen, das etwa durch die Verlängerung der Wände des Facettengliedes begrenzt wird und wir dieses Gebiet als Sehfeld des Einzelauges bezeichnen, so schließen sich diese Sehfelder ebenso zusammen wie die Einzelaugen selbst. Durch einen leuchtenden Gegenstand werden ebenso viele Facettenglieder gereizt als er Sehfelder von solchen einnimmt, und die Fläche des Gegenstandes zerfällt dementsprechend in ebenso viele Einzelfelder, die je einem Facettenglied zugeordnet sind. Von der mittleren Helligkeit jedes Objektfeldes hängt die Stärke des Reizes ab, der auf das zugeordnete Rhabdom ausgeübt wird: man kann sich z. B. ein Schachbrett so einem Auge mit vierseitigen Facettengliedern (etwa von Palaemon, Fig. 67, C) gegenübergestellt denken, daß jedes seiner Felder gerade das Sehfeld eines Facettengliedes füllt; dann werden die einen Rhabdome des Auges stark, die anderen nur wenig gereizt. Die Kombination der Einzelreize zum Gesamtreiz ist verglichen worden mit der Kombination

der farbigen Steinchen eines musivischen (= Mosaik-) Bildes zum Bild, und daher bezeichnete man diese Art des Sehens als musivisches Sehen. Joh. Müller hat eine solche Art des Funktionierens für die Facettenaugen postuliert und Exner hat sie aus physiologischen, Grenacher aus morphologischen Gesichtspunkten als zutreffend erwiesen. Es ist dieselbe Art des Bildsehens, wie wir sie für das zusammengesetzte Auge von Branchiomma oben schon kennen gelernt haben.

Die Zahl der Fazettenglieder ist bei verschiedenen Arthropoden sehr verschieden. Genaue Zählungen liegen fast nur für Käfer vor (Leinemann). Am lehrreichsten ist die Vergleichung einer Anzahl von Käfern, die alle nahezu gleich lang sind (29 bis 30 mm); es haben in einem Auge der Pappelbock (Saperda carcharias) 1825, ein Laufkäfer (Carabus violaceus) 3500, das Weibchen des Maikäfers (Melolontha vulgaris) 5100, der Gelbrand (Dytiscus marginalis) 9000, ein Männchen des Walkers (Polyphylla fullo) 11500, der Nashornkäfer (Oryctes nasicornis) 11500, ein Totengräber (Necrophorus germanicus) 30000 Fazettenglieder. Demgegenüber erscheinen die Angaben für die große Libelle Aeschna grandis mit 10000 und den Totenkopf (Acherontia atropos) mit 12400 als zu niedrig. Interessant ist, daß bei dem Leuchtkäferchen (Lampyris splendidula) das fliegende Männchen 2500, das ungeflügelte Weibchen dagegen nur 300 Fazettenglieder in einem Auge besitzt.

Die enge Zusammenlagerung der Einzelaugen im Facettenauge, welche für das Bildsehen von so wesentlicher Bedeutung ist, bringt aber einen Nachteil mit sich: die Form der Facettenglieder wird dabei schlank, und die Oberfläche der Cornealinse recht klein; infolgedessen kann von einem leuchtenden Punkte nur verhältnismäßig wenig Licht zu dem Rhabdom gelangen. Bei einer Arbeitsbiene ist der Durchmesser der Linse von einem Facettenglied 19 μ, von dem mittleren Stirnocell 240 μ; die Oberfläche der letzteren ist also, von der Wölbung abgesehen, 160 mal so groß. Bei gleichem Abstand und sonst gleichen Umständen gelangt also zu einem rezipierenden Element des Stinrocells 160 mal so viel Licht als zu dem Rhabdom eines Facettengliedes. Diese Ueberlegung zeigt, daß die Facettenaugen recht lichtschwach sind. Das ist von geringerer Bedeutung für jene Insekten, die in der Sonne oder wenigstens bei Tage fliegen, wie Libellen, Tagfalter, Bienen, Fliegen, Prachtkäfer u. a. Dagegen bei Dämmerungstieren wie Ohrwurm und Küchenschabe muß dadurch die Leistung des Auges beeinträchtigt werden; wir finden denn auch bei ihnen plumpere Facettenglieder mit größeren Cornealinsen: auf Kosten der Deutlichkeit des Bildes (s. unten) sind die Einzelaugen weniger schlank, aber dafür lichtstärker. Eine Vergrößerung der Cornealinse ohne Beeinträchtigung der Sehleistung ist möglich, wenn die Facettenglieder verlängert werden; wenn das Facettenglied eine abgestumpfte Pyramide darstellt derart, daß sie nur die halbe Höhe der ganzen Pyramide hat, so wird bei einer Verlängerung des Facettengliedes auf seine doppelte Länge der Durchmesser der Cornealinse von 2 auf 3, ihre Oberfläche von 4 auf 9, also auf mehr als das Doppelte zunehmen und demnach auch mehr als doppelte Lichtstärke haben. So erklärt sich die bedeutende Länge der Facettenglieder in den Augen mancher Heuschrecken, der Mantis und der Libellen im Vergleich zu Ohrwurm und Küchenschabe.

Bei vielen Augen von Krebsen und nächtlich lebenden Insekten führt aber ein anderer Weg zur Vergrößerung der Lichtstärke; er beruht auf der eigentümlichen Art der Lichtbrechung durch die Kristallkegel der eukonen Augen. In den Zellkegeln und Sekretkegeln der akonen und pseudokonen Augen wird das Licht durch totale Reflexion an den Kegelwänden zu dem Rhabdom geleitet, das sich der Spitze des Kegels unmittelbar anschließt (Fig. 67, A u. B). Anders in den Kristallkegeln: ihre Substanz ist nicht überall von gleicher Dichte; die axialen Teile sind am dichtesten und brechen das Licht am stärksten, und die Brechkraft nimmt gegen die Peripherie mehr und mehr ab. Dadurch wird bewirkt, daß die Lichtstrahlen, die schräg zur Achse einfallen, in den Kristallkegeln nicht einen geradlinigen, sondern einen bogenförmigen Verlauf nehmen und schließlich nach der Seite abgelenkt werden, von der sie kommen (Fig. 68). Die Ablenkung ist so bemessen, daß die Lichtstrahlen von einem Punkte



Fig. 68. Gang der Lichtstrahlen im Kristallkegel des eukonen Arthropodenauges. Die schräg zur Achse von rechts kommenden Strahlen p und q werden nach rechts aus dem Kegel herausgeleitet p′q′. Nach Exner.

zu dem zugeordneten Rhabdom nicht bloß durch den ihm zugeordneten optischen Apparat gelangen, sondern auch durch die Kristallkegel der umliegenden Facettenglieder ebendahin geleitet werden (Fig. 69). Es werden also auf dem Rhabdom nicht bloß die Strahlen vereinigt, welche die eine zugeordnete Cornealinse passieren, sondern

auch alle jene, die zu den in erster Linie benachbarten 6, vielleicht auch jene, die zu den in zweiter Linie benachbarten 12 Cornealinsen kommen, also 6-mal oder 18-mal mehr als bei einem akonen Auge; das Auge hat die 7- oder 19-fache Lichtstärke. Damit aber jene Nebenstrahlen das Rhabdom erreichen können, müssen zweierlei Bedingungen erfüllt sein: 1. dürfen die Facettenglieder nicht durch zusammenhängende Pigmenthüllen vollkommen getrennt sein, und 2. müssen die Rhabdome in einem bestimmten Abstande von der proximalen Spitze der Kristallkegel gelegen sein; denn Strahlen, die das stark lichtbrechende Rhabdom an seinen Seitenwänden unter spitzem Winkel treffen, können nicht in dasselbe eindringen, sondern werden total reflektiert, nur Strahlen, die auf die Endfläche auffallen, gelangen in das Rhabdom. Eine solche Lage des Rhabdoms beobachtet man denn auch bei den zehnfüßigen Krebsen (Fig. 67, C), vielen Käfern und den Nachtschmetterlingen (Fig. 67, D). Das Pigment aber kann in den Augen dieser Tiere seine Lage verändern, wie aus einfachen Versuchen hervorgeht (Fig. 70): tötet man einen Nachtschmetterling im Hellen ab, nachdem er einige Stunden dort verweilte, so ist die Verteilung des Pigments bei ihm ähnlich wie bei einem Insekt mit akonen Augen: das Facettenglied wird vollständig davon umscheidet; setzt man ihn aber einige Stunden in die Dunkelheit und tötet ihn dort, so hat sich das Pigment der Nebenpigmentzellen zwischen die Kristallkegel zurückgezogen und dadurch den Weg für die Strahlen, die von den nächst benachbarten Kristallkegeln kommen, frei gemacht; die Strahlen von den weiter entfernten Kristallkegeln werden aber immer noch von diesem Pigment aufgefangen (Fig. 69, rechts). — Durch solche Art der Lichtbrechung wird erreicht, daß die optischen Apparate des ganzen zusammengesetzten Auges zusammenwirken und ein einheitliches aufrechtstehendes Bild erzeugen; Exner konnte das von dem isolierten optischen Gesamtapparat des Leuchtkäferauges entworfene Bild sogar mikrophotographisch aufnehmen (wobei allerdings bemerkt werden muß, daß beim Leuchtkäfer die Kristallkegel funktionell durch zapfenförmige Vorsprünge der Cornealinsen vertreten werden). Mit Exner bezeichnet man das Sehen, welches in der beschriebenen Weise zustande kommt, als Superpositionssehen, die Augen als Superpositionsaugen; im Gegensatz dazu haben wir bei allen akonen und pseudokonen und vielleicht auch bei manchen eukonen Facettenaugen ein Appositionssehen. Die Superpositionsaugen können aber, dank der durch den Lichtreiz ausgelösten Pigmentverschiebung, in hellem Licht als Appositionsaugen fungieren, so daß eine Schädigung der sehr lichtempfindlichen rezipierenden Endorgane durch zu große Lichtfülle verhindert wird.



Fig. 69. Schema des Strahlenverlaufs im eukonen Facettenauge (Superpositionsauge). cl Cornealinse, kk Kristallkegel.
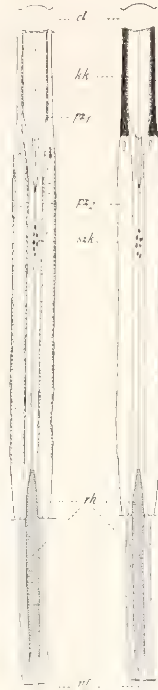


Fig. 70. Facettenglieder aus dem Auge eines Nachtfalters, links mit Lichtstellung, rechts mit Dunkelstellung des Pigments. cl Cornealinse, kk Kristallkegel, nf Nervenfasern, pz_1 Hauptpigmentzellen (Corneagenzellen), pz_2 Nebenpigmentzellen, rh Rhabdom, szk Kerne der Seh- (Retinula-) Zellen.

Bei manchen Krebsen und Insekten sind die Retinulae der Fazettenaugen nicht durch das lichtabsorbierende Pigment, sondern durch einen lichtreflektierenden Apparat, ein sogenanntes Tapetum isoliert, wie es auch bei vielen Stirnocellen von Insekten in gleicher Verwendung vorkommt (Fig. 60, A u. B, tap). Dieses Tapetum ist entweder ein mit feinsten Kriställchen beladenes Gewebe wie bei manchen Tagfaltern und Krebsen (z. B. Palaemon; so auch bei den angeführten Stirnocellen), oder es wird gebildet durch zahlreiche Tracheen, deren Lufträume durch totale Reflexion seitlich abweichende Strahlen zum Rhabdom leiten; viele Libellen, Fliegen und Nachtschmetterlinge haben ein solches Tracheentapetum.

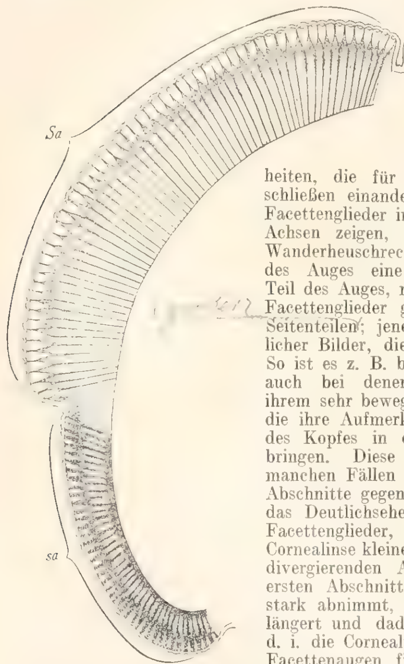


Fig. 71. Medianschnitt durch das Auge des Männchens der Aprilfliege (Bibio). Sa Teil mit wenig divergierenden, sa Teil mit stärker divergierenden Achsen der Facettenglieder.

Für die Leistungsfähigkeit des Facettenauges ist die Form der Facettenglieder von großer Wichtigkeit: je mehr sich der Basiswinkel der Pyramide (der von der Seitenwand und der Cornea gebildet wird) einem rechten nähert, d. h. je größer die Höhe der (nicht abgestumpften) Pyramide ist, um so weniger werden die Achsen benachbarter Facettenglieder nach außen divergieren, und um so langsamer wird daher der Durchmesser der Einzelsehfelder mit der Entfernung vom Auge zunehmen. Derselbe Gegenstand wird in der gleichen Entfernung zahlreichere Sehfelder ausfüllen bei einem Auge mit wenig divergierenden Achsen der Facettenglieder als bei einem solchen mit stark divergierenden Achsen; das erstere Auge wird also deutlichere Bilder geben als das letztere. Auf der anderen Seite wird, bei gleicher Zahl der Facettenglieder letzteres Auge ein größeres Gesamtsehfeld haben. Facettenaugen mit großem Gesamtsehfeld springen im allgemeinen stark kugelig am Kopfe vor, solche mit deutlichen Bildern schmiegen sich der Oberfläche des Kopfes mehr an. Beides, sowohl Deutlichkeit der Bilder als großes Sehfeld, sind Besonderheiten, die für das Tier von Nutzen sind, aber sie schließen einander aus. Es gibt Facettenaugen, deren Facettenglieder in allen Teilen die gleiche Divergenz der Achsen zeigen, z. B. bei den Spinnern oder bei der Wanderheuschrecke. Bei anderen aber ist innerhalb des Auges eine Arbeitsteilung eingetreten: in einem Teil des Auges, meist in der Mitte, ist die Divergenz der Facettenglieder geringer in anderen, besonders in den Seitenteilen; jene Abschnitte sind für das Sehen deutlicher Bilder, diese für ein großes Sehfeld eingerichtet. So ist es z. B. bei den Augen der großen Libellen, so auch bei denen der Raubfliegen; diese Tiere mit ihrem sehr beweglichen Kopf können dann Gegenstände, die ihre Aufmerksamkeit erregen, durch eine Drehung des Kopfes in den Bereich des deutlichen Bildsehens bringen. Diese Arbeitsteilung in den Augen hat in manchen Fällen zu einer deutlichen Absetzung zweier Abschnitte gegeneinander geführt. In dem Abschnitt für das Deutlichsehen mußte, entsprechend der Form der Facettenglieder, bei gegebener Länge derselben die Cornealinse kleiner sein als in dem Abschnitt mit stärker divergierenden Achsen der Facettenglieder; damit im ersten Abschnitt die Lichtstärke des Auges nicht zu stark abnimmt, werden dort die Facettenglieder verlängert und dadurch die Grundflächen der Pyramiden, d. i. die Cornealinsen, vergrößert. Derartig zweiteilige Facettenaugen finden wir bei dem Krebschen Bythotrephes und bei manchen Dipterenmännchen z. B. Bibio (Fig. 71). In vielen Fällen ist dieser Augenabschnitt mit den verlängerten, wenig divergierenden Facettengliedern vor dem anderen noch durch die geringere Pigmentierung ausgezeichnet: die Facettenglieder sind unvollkommen voneinander getrennt, die Zerstreuungskreise der optischen Apparate umgreifen zahlreichere Rhabdome und so werden zwar die Bilder verschwommener, aber bei der Bewegung der Gegenstände trifft der dadurch gesetzte Wechsel der Reizung zahlreichere Rhabdome, und die

Bewegung wird dadurch deutlicher sichtbar: somit sind solche schwachpigmentierte Augenabschnitte für Bewegungssehen besonders eingerichtet. Solche Verminderung des Pigments ist schon in den betreffenden Abschnitten des Libellenauges vorhanden und ist bei Bibio (Fig. 71) deutlich, noch auffälliger ist sie an dem mächtigen „Frontauge" der Tiefseeschizopoden (Fig. 72) und an den Turbanaugen der männlichen Eintagsfliegen.

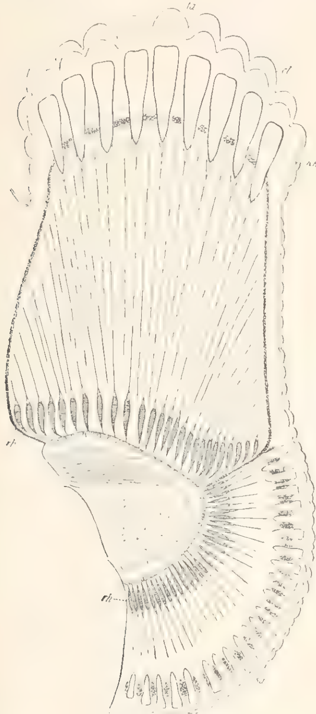


Fig. 72. Facettenauge eines Tiefseekrebses (Stylocheiron mastigophorum). fa „Frontauge", sa Seitenauge, cl Cornealinse, kk Kristallkegel, rh Rhabdom. Nach Chun.

Die letztgenannten Augen zeigen noch eine Besonderheit (Fig. 72): in ihrem Abschnitt mit wenig divergenten Achsen (fa) ist die Zahl der Kristallkegel viel geringer als die Zahl der Rhabdome; die seitlichen Facettenglieder dieses Abschnittes haben keine Kristallkegel ausgebildet; die zugehörigen Kegelzellen sind zwar vorhanden und liegen unter der Epidermis, aber zu Kegeln sind sie nicht geworden. Alle Rhabdome erhalten das Licht von der verminderten Zahl der Kristallkegel. Es ist das zusammengesetzte Auge wieder zu einer Einheit geworden, indem die Summe der Kristallkegel als unabhängiger lichtbrechender Apparat, die Summe der Rhabdome wie eine einheitliche Netzhaut funktioniert. — Noch auffälliger ist eine Vereinheitlichung des Facettenauges auf anderem Wege bei manchen Amphipoden (Fig. 73) erreicht: hier ist vor

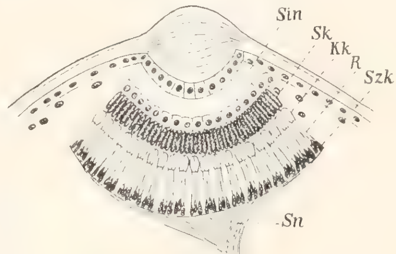


Fig. 73. Facettenauge mit Sammellinse von dem Flohkrebs Ampelisca callopia. Sin Blutsinus, Sk Kerne der Kegelzellen, Kk Kristallkegel, R Retinula, Szk Sehzellkerne, Sn Sehnerv. Nach Strauß.

die Summe der Facettenglieder eine große Cornealinse gesetzt; die einzelnen lichtbrechenden Apparate sind zurückgebildet, und die rezipierenden Teile des Facettenauges bilden zusammen eine Retina und sind gegen das Linsenzentrum konvergent geworden. Die Zellanordnung des Facettenauges ist bewahrt, die Funktionsweise aber ist die eines einheitlichen Linsenauges.

Es konnte hier nur ein ganz kurzer Ueberblick über die bemerkenswerten Umbildungen und Anpassungen des zusammengesetzten Auges der Arthropoden gegeben werden. Bei einer außerordentlichen Einheitlichkeit des morphologischen Aufbaues im einzelnen eine ungemeine Wandelbarkeit der Gesamtform und der Funktionsweise. Das Facettenauge der Arthropoden ist ein Proteus an Vielgestaltigkeit, dessen genaues Studium immer neue, interessante Seiten enthüllt hat und auch noch weiterhin zu enthüllen verspricht.

Die Wirbeltieraugen. Die Wirbeltieraugen nehmen in der Reihe der Sehorgane eine Sonderstellung ein, einmal wegen ihrer eigenartigen Entwickelung, der Abstammung ihrer Teile von ganz verschiedenen Grund-

lagen und wegen der daraus erklärbaren Gestaltung der Netzhaut, und zweitens wegen der wechselnden Wege der Akkommodation, die in jeder Klasse ihre Besonderheiten aufweist.

Der Augapfel (Fig. 74) ist im allgemeinen kugelig gestaltet, und wir wollen bei der Beschreibung seine Wand von dem Inhalt, Glaskörper und Linse, scheiden. Seine distale Wand ist durchsichtig und wird Hornhaut (Cornea) genannt; sie wird von einem dünnen geschichteten Epithel überzogen, das einen umgewandelten Abschnitt der Epidermis des Körpers bildet. Der durch die Mitte der Hornhaut gehende Augendurchmesser bildet die Achse des Auges. Die bindegewebige Grundlage der Hornhaut setzt sich ohne Unterbrechung in die harte Augenhaut (Sklera) fort, die in den übrigen Teilen die Außenwand des Augapfels bildet; sie besteht aus straffem Bindegewebe und wird nicht selten durch Einlagerungen von Knorpel oder Knochen gestutzt. Ihr lagert sich dem Glaskörper zu („vitral“) die Aderhaut (Chorioidea) auf, welche reich an Blutgefäßen ist und in ihrer bindegewebigen Grundlage meist reichlich Pigment enthält. Die innerste Schicht der Augenwand ist die Netzhaut (Retina) mit dem genetisch zu ihr gehörigen, der Aderhaut aufliegenden Pigmentepithel (Tapetum nigrum). Wo die Sklera in die Hornhaut übergeht, springen von der Augenwand in das Innere ein paar zusammenhängende Ringfalten vor, der Ciliarkörper (Corpus ciliare) und die Iris, beide auf der Vitralseite mit einem epithelialen Ueberzug auf einem bindegewebigen, in der Fortsetzung der Chorioidea gelegenen Stroma. Das Irisepithel und meist auch das Stroma sind pigmentiert; der Rand der Iris begrenzt das Sehloch, die Pupille, durch deren Mitte die Augenachse geht. Vitral von Hornhaut und Iris liegt die Linse derart, daß ihre Achse mit der Augenachse zusammenfällt. Sie ist am Ciliarkörper befestigt durch feine sezernierte Fäden, die zu beiden Seiten ihres Aequators an sie ansetzen und in ihrer Gesamtheit das Strahlenbändchen (Zonula ciliaris) bilden. Der Raum zwischen Linse und Hornhaut wird durch die Iris in zwei Abschnitte geteilt, die vor der Iris gelegene vordere Augenkammer und die zwischen Iris und Zonula gelegene ringförmige hintere Augenkammer. Der Raum zwischen Linse und Netzhaut wird durch den Glaskörper (Corpus vitreum), eine durchsichtige wasserreiche Masse von gallertiger Beschaffenheit, erfüllt.

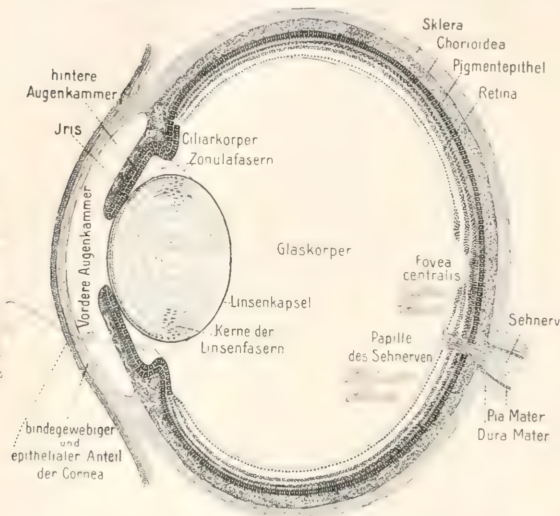


Fig. 74. Schema des Wirbeltierauges. Ausmaße der Zellen in falschem Verhältnis.

Das Verständnis für den Bau der Hauptbestandteile des Auges wird uns durch dessen Entwickelungsgeschichte erschlossen; deshalb sei zunächst diese betrachtet (Fig. 75). Die erste Anlage des Auges besteht in paarigen Ausstulpungen der ersten primitiven Hirnblase, die seitlich gegen die Epidermis verwachsen, den sogenannten primären Augenblasen; sie schnüren sich derart vom Hirn ab, daß sie nur noch durch einen Stiel damit im Zusammenhang bleiben. Aus den primären Augenblasen wird durch Wachstumsvorgänge der (sekundäre) Augenbecher mit doppelten Wandungen derart, als wäre die äußere Wand der primären Augenblase

eingestülpt. Dieses Einwachsen geschieht so, daß der Augenbecher nicht bloß dem Stiel gegenüber eine Oeffnung hat, sondern auch auf der ventralen Seite durch einen Schlitz offen bleibt, der sich vom Becherrand bis

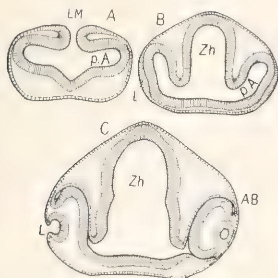


Fig. 75. Entwickelung des Wirbeltierauges. Querschnitte durch den Vorderkopf des Hühnchens am Anfang des 2. Bebrütungstages (A), am Ende des 2. Tages (B) und am Ende des 3. Tages (C). LM Lippen der Medullarrinne; pA primäre Augenblase; AB Augenbecher; L Linse; Zh Zwischenhirn. In Fig. C ist rechts die Entwickelung der Linse weiter vorgeschritten gezeichnet als links; links geht der Schnitt durch den embryonalen Augenspalt, rechts daneben vorbei. Die freie Oberfläche des ektodermalen Epithels ist stärker konturiert.

zum Ansatz des Stiels erstreckt (Fig. 75, C links und Fig. 76); das ist der sogenannte embryonale Augenspalt. Die innere Wandschicht des Augenbechers ist viel dicker als die äußere und wird zur Netzhaut, die äußere zum Pigmentepithel; der Augenspalt schließt sich später durch Verwachsung seiner Ränder. Der Augenstiel bildet die Grundlage für den Sehnerven und hängt mit dem Gehirn an der Basis des Zwischenhirns zusammen. An der Stelle, wo der Augenbecher die Epidermis berührt, entsteht eine Verdickung und Einstülpung derselben, die sich weiterhin als geschlossenes Säckchen von ihrem Mutterboden abschnürt: das Linsenbläschen; bei vielen Tieren muß seine Bildung durch Berührung des Augenbechers mit der Epidermis ausgelöst werden. Die der Epidermis zugekehrte Wand des Linsenbläschens bleibt dünn und wird zum Linsenepithel, die ihr abgekehrte Wand verdickt sich, füllt den Hohlraum des Bläschens aus und bildet unter Umwandlung seiner Zellen zu Linsenfasern die Grundlage für den Körper der Linse; am Aequator der Linse, wo sich diese beiden Teile berühren, ist die Wachstumszone, wo durch beständige Zellvermehrung neues Material zur Bildung von Linsenfasern geschaffen wird. Der Rand des Augenbechers wächst zwischen Linse und Epidermis ein und liefert den epithelialen Anteil des Ciliarkörpers und der Iris; er begrenzt somit die Pupille. Die das Auge überziehende Epidermis mit der darunter liegenden Bindegewebslage wird zur Hornhaut. Der Glaskörper entsteht in seinen Grundlagen durch Absonderung seitens der Zellen der noch undifferenzierten Netzhaut, der Linsenhinterwand und vor allem des epithelialen Anteils des Ciliarkörpers. Außerdem wachsen durch den embryonalen Augenspalt Bindegewebszellen und Gefäße in das Augeninnere ein, vor allem die Arteria centralis retinae, die den Glaskörper durchsetzt und sich auf der Hinterfläche der Linse in Kapillaren auflöst, die dieser Nahrung zuführen. Die Chorioidea und ihre Differenzierungen, das Stroma des Ciliarkörpers und der Iris, sowie die Sklera entstehen als Umbildungen des den Augenbecher umgebenden Bindegewebes. Durch den embryonalen Augenspalt wachsen auch die Fasern des Sehnerven, die zum allergrößten Teil von Zellen auf der vitralen Seite der Netzhaut ihren Ursprung nehmen (nur wenige wachsen von Zellen des Mittelhirns aus) aus dem Auge heraus, und nach Schluß des Spaltes durchbohren sie dann die Augenwand.



Fig. 76. Augenbecher mit Linse und embryonalem Augenspalt. Der Verlauf der Wand im Medianschnitt ist punktiert. Nach Froriep.

Die merkwürdige Entstehung der Netzhaut durch Ausstülpung der embryonalen Gehirnwandung weicht ab von der sonst beobachteten Entstehung der Retina bei Linsenaugen (Ringelwürmer, Arthropoden, Mollusken) durch direkte grubenförmige Einstülpung der Epidermis. Dies Verhalten ist historisch zu erklären. Bei den Verwandten der Wirbeltiere, den Manteltieren und Amphioxus, liegen die Sehorgane im zentralen Nervensystem, das dem der Wirbeltiere homolog ist; bei den Ascidienlarven bildet sich Auge durch Umbildung eines Teils der Sinnesblasenwand (Fig. 27 S. 46); beim Amphioxus sind Sehzellen, zum Teil von Pigmentbechern umgeben, durch das ganze Rückenmark verteilt, an seinem vorderen Ende aber besonders reichlich angehäuft. Da bei kleinen und durchsichtigen Tieren das Licht leicht bis in das Zentralnervensystem eindringen kann, so ist die Lage der

Sehorgane an dieser Stelle nicht erstaunlich; auch bei den Capitelliden finden sich Pigmentbecherocelle, bei den Regenwürmern Sehzellen im Cerebralganglion. So werden also auch bei den unmittelbaren Vorfahren der Wirbeltiere die Sehorgane in dem zentralen Nervensystem gelegen sein. Als aber im Laufe der Stammesentwickelung die Größe der Tiere zunahm und ihr zentrales Nervensystem noch dazu durch dichte undurchsichtige Hüllen gegen Verletzungen geschützt wurde, da konnten Sehorgane dort nicht mehr funktionieren; sie wurden durch Ausstülpung der Hirnwand der Oberfläche genähert und über jener Ausstülpung bildete sich, vielleicht als Neubildung, vielleicht aber auch als Umbildung eines Sinnesorgans, eine Verdickung und später Einstülpung der Oberhaut, die zur Linse wurde.

Die Netzhaut des Wirbeltierauges ist also ein Gehirnteil, und das gibt uns die Erklärung für viele ihrer Besonderheiten (Fig. 77). Sie entsteht durch Umbildung eines einschichtigen Epithels und behält die Eigentümlichkeiten eines solchen ständig bei in ihren Stützzellen, den sogenannten Müllerschen Zellen, die mit ihren Enden bis zu den beiden Begrenzungsflächen dieses Epithels, der inneren und äußeren Grenzmembran (M. limitans interna und externa) reichen, so wie beim Rückenmark der Wirbeltiere, wenigstens in embryonaler Zeit, die Ependymzellen Zeugen der ursprünglich einschichtigen



Fig. 77. Schema der Wirbeltiernetzhaut. Rechts das gewöhnliche Bild, links die Bestandteile bei Chromsilberimprägnation elektiv gefärbt; ganz links Verlauf der Sehnervenfasern.

Epithelgrundlage bilden (vgl. den Artikel „Nervensystem" Band VII, S. 126, Fig. 7). Die übrigen Zellen des Epithels sind, wie im Zentralnervensystem allgemein, zu Neuronen geworden, und zwar sind drei Schichten Neuronen übereinander angeordnet und stehen miteinander innerhalb der Netzhaut durch ihre Endbäumchen in Verbindung. Diese drei Neuronen sind 1. die Sehzellen, 2. die bipolaren Zellen und 3. die sogenannten Ganglienzellen. Daraus ergibt sich ein schichtenförmiger Aufbau der Netzhaut, indem die Lagen, in denen die Zellkörper der Neurone mit den Kernen (daher Körnerschichten) liegen, abwechseln mit den sogenannten molekularen oder granulierten Schichten, d. h. den Nervenfilzschichten, die durch Verflechtung der Endbäumchen entstehen. Die Benennungen der Schichten im einzelnen sind in der Erklärung von Figur 77 angegeben.

Die Sehzellen sind primäre Sinneszellen und liegen der hinteren Grenzmembran an; sie tragen an ihrem freien Ende ein rezipierendes Organ, das von verschiedener Gestalt sein kann und als Stäbchen oder Zapfen bezeichnet wird. Stäbchen und Zapfen durchbohren die Grenzmembran und ragen über sie hinaus, ja es kommt sogar vor, daß die Zellkörper der Sehzelle mit dem Kern ein Stück weit durch die Membran hindurchtreten. Ein durchgängig zutreffendes Unterscheidungsmerkmal für Stäbchen und Zapfen läßt sich nicht angeben; meist aber sind die Stäbchen zylindrisch, die Zapfen flaschenförmig, mit ihrem breiten Ende der Zelle zugekehrt, und kürzer; innerhalb der gleichen Retina aber kann kein Zweifel über die Unterscheidung der beiderlei Endorgane sein. Fast durchweg unterscheiden sich aber Stäbchen- und Zapfenzellen dadurch, daß der Nervenfortsatz der Stäbchenzelle in ein einziges Endknöpfchen, derjenige der Zapfenzelle in ein Endbäumchen übergeht. Diese treten innerhalb der äußeren Nervenfilzschicht in Beziehung zu den Endbäumchen der bipolaren Zellen, und zwar gehören zu einem solchen Endbäumchen die Endknöpfchen zahlreicher Stäbchenzellen oder ein Endbäumchen einer Zapfenzelle; dabei ist es aber, nach der Zahl der bipolaren Zellen zu urteilen, wahrscheinlich, daß jedes Endknöpfchen einer Stäbchenzelle mit mehreren Bipolaren in Beziehung tritt. Außerdem liegen in der Schicht der bipolaren Zellen auch noch sogenannte horizontale Zellen, deren Fortsätze parallel der Oberfläche der Netzhaut verlaufen und verschiedene Stellen derselben untereinander verknüpfen. Der zentrale Fortsatz der bipolaren Zellen tritt mit seinem Endbäumchen in Beziehung zu den Endbäumchen der Ganglienzellen in der inneren Nervenfilzschicht, und nach der anderen Seite entspringt vom Zellkörper der Ganglienzelle eine Nervenfaser, die unter der inneren Grenzmembran zu der Stelle verläuft, bis wohin der embryonale Augenspalt reicht, und von dort, durch diesen Spalt durchtretend, den Augenblasenstiel entlang ins Gehirn (Mittelhirn oder Zwischenhirn, vgl. den Artikel „Ner-

vensystem“ Bd. VII S. 136) zieht. Wenn der Spalt dann geschlossen ist, erscheint die Netzhaut vom Sehnerven durchbohrt. An dieser Stelle fehlt also das Sehepithel und damit auch die Lichtreizbarkeit, es ist der sogenannte blinde Fleck.

Um zu den reizaufnehmenden Stellen zu gelangen, muß also das Licht im Wirbeltierauge eine Reihe von Schichten durchdringen, die um so dicker sind, je höher das Auge entwickelt ist, d. h. je zahlreicher die Stäbchen und Zapfen und damit auch die Neurone der übrigen Schichten sind. Dabei muß es notwendig an Intensität verlieren. Es ist also diese Anordnung der Stäbchen und Zapfen, die sogenannte Inversion der Netzhaut, eine „unzweckmäßige“ Einrichtung. Auch das läßt sich aber aus der Entwickelung erklären. Die rezipierenden Abschnitte von Sinneszellen, wie Riech- und Schmeckhärchen oder Sehstäbchen, entstehen allgemein bei Epithelzellen an dem Ende, das der Körperoberfläche zugekehrt ist, die Nervenfaser dagegen an dem entgegengesetzten Ende. Jenes „freie“ Ende der Epithelzellen kommt aber bei Einstülpung des Rückenmarkrohres in den Zentralkanal und bei Wiederausstülpung der Augenblase in das Innere der Blase zu liegen (Fig. 75); bei der eingestülpten Augenblase, dem Augenbecher, muß es also da liegen, wo die beiden Wände des Bechers sich berühren und dort, d. h. an der dem Licht abgewandten Seite entstehen dann auf der inneren Becherwand, d. h. der Netzhaut, die Stäbchen und Zapfen. Um diese „Unzweckmäßigkeit“ auszugleichen, ist an den Stellen deutlichsten Sehens (Area centralis), wo die Zahl der rezipierenden Elemente stark vermehrt ist, häufig zugleich auf beschränktem Raum die Netzhaut verdünnt durch eine grubenförmige Einsenkung (Fig. 74), es entsteht eine sogenannte Netzhautgrube (beim Menschen Fovea centralis retinae) dadurch, daß die Neuronenschichten seitlich auseinander gedrängt sind und das Licht somit nur die Zellkörper der Sehzellen zu durchsetzen braucht. An den Stellen deutlichsten Sehens in der Netzhaut der Tintenfische, wo ebenfalls die Zahl der Stäbchen auf der Flächeneinheit bedeutend vermehrt ist, kommt natürlich nirgends eine Verdünnung der Netzhaut vor, da ja hier die Stäbchen dem Licht zugekehrt sind (Fig. 59), ebenso wie bei ihnen kein blinder Fleck vorhanden ist. Netzhautgruben finden sich in der Wirbeltierreihe bei einigen Fischen (Hippocampus, Siphonostoma), unter den Reptilien beim Chamäleon, einigen Eidechsen, Schlangen und Schildkröten, bei vielen Vögeln und unter den Säugern bei den Affen und Menschen. Manche Vögel (Falken, Möven, Entenvögel) haben zwei Netzhautgruben, von denen die eine axial liegt, während die andere schläfenwärts verschoben ist; erstere dient für das monokulare, letztere wahrscheinlich für das binokulare Sehen. Eine Area centralis aber, zu der die Netzhautgrube nur als besondere Differenzierung gehört, ist weiter verbreitet und kommt z. B. vielen Säugern oder auch dem Frosch zu, bei dem sie als ein kleiner Streifen oberhalb des Sehnervenaustrittes quer über die Netzhaut zieht, ohne daß hier eine Fovea vorhanden ist.

Das Vorhandensein von zweierlei rezipierenden Endapparaten an den Sehzellen, die als Stäbchen und Zapfen äußerlich verschieden sind, und die Verschiedenheit in der Verknüpfung der zugehörigen Zellen mit den Bipolaren läßt auch auf eine Verschiedenheit der Funktion der beiderlei Sehzellen schließen. Nur Stäbchen sind vorhanden bei Cyklostomen und Selachiern, ferner bei den Tiefseefischen, und auch bei manchen Säugern fehlen die Zapfen ganz, so bei den Fledermäusen, Igel, Maulwurf und den Wassersäugern (Walen, Sirenen, Robben); spärlich sind die Zapfen bei einigen nächtlich lebenden Nagern und beim Iltis. Also es sind vorwiegend nächtlich lebende und wasserbewohnende Tiere, denen die Zapfen fehlen. Dagegen haben die Reptilien meist nur Zapfen (die Krokodile auch viele Stäbchen), und bei den Vögeln überwiegt ihre Zahl die der Stäbchen (außer bei den Eulen); die Säuger aber haben mehr Stäbchen als Zapfen. Unter der Netzhautgrube stehen beim Menschen nur Zapfen, während im ganzen die menschliche Netzhaut 18 mal mehr Stäbchen als Zapfen enthält. Die Verhältnisse der Verteilung von Stäbchen und Zapfen in der Tierreihe und ihre Verteilung in der menschlichen Netzhaut, im Zusammenhang mit Versuchsergebnissen am Menschen (mangelhaftes Farbensehen mit der zapfenarmen Netzhautperipherie, Versagen der stäbchenfreien Netzhautgrube bei schwacher Beleuchtung) haben zu der Hypothese geführt, daß die Stäbchen nur der Unterscheidung verschiedener Lichtintensitäten fähig sind, dabei aber eine größere Reizbarkeit besitzen als die Zapfen, während die Zapfen zur Unterscheidung verschiedenfarbigen Lichtes dienen, aber größerer Lichtmengen zu ihrer Reizung bedürfen.

Die Zellen des Pigmentepithels der Netzhaut besitzen Fortsätze, welche sich zwischen die Stäbchen und Zapfen einschieben und diese optisch isolieren. Bei den Fischen und Amphibien verschiebt sich das Pigment in diesen Fortsätzen unter dem Einflusse der Beleuchtung derart, daß es bei Lichtfülle zwischen die Stäbchen und Zapfen vorwandert, bei schwachem Licht dagegen sich zurückzieht. Bei den Reptilien und den meisten Vögeln sind diese Pigmentwanderungen unbedeutend, bei den Säugern fehlen sie ganz. Bei manchen Wirbeltieren, bei denen die Chorioidea in ihrer der Netzhaut zugekehrten Oberfläche zum Licht reflektierenden Tapetum umgewandelt ist, enthält das Pigmentepithel über diesen Stellen kein

Pigment. Ein solches Tapetum findet sich bei vielen Fischen, sehr regelmäßig bei Tiefseefischen und bei zahlreichen Säugern, so Wassersäugern, manchen Raubtieren (Katze!), Huftieren (Schaf) u. a.; manchmal ist es auf einen Teil des Auges beschränkt, so beim Brachsen (Abramis brama) auf die dorsale Hälfte, die ihr Licht vom Boden des Wassers bekommt, also schwächer beleuchtet ist. — Die Chorioidea und Sklera entsprechen der weichen und harten Hirnhaut, mit denen sie durch entsprechende Hüllen des Sehnerven in ununterbrochenem Zusammenhange stehen (Fig. 74).

Die Hornhaut besteht aus einer bindegewebigen Grundlage mit einem epithelialen Ueberzug, der einen modifizierten, nicht verhornten Abschnitt der Epidermis bildet. Bei Lufttieren ist die Cornea sehr wichtig für die Lichtbrechung und daher ist ihre Wölbung stark und sehr regelmäßig. Bei Wassertieren dagegen spielt sie eine ganz unbedeutende Rolle für die Lichtbrechung, da ihr Brechungsindex fast dem des Wassers gleich ist (bei einem Wal, Balaenoptera borealis, z. B. 1,3762, für Seewasser 1,3393); sie ist auch hier gewölbt, um dem Wasserdruck leichter standzuhalten; bei den Fischen ist die Wölbung oft in zwei aufeinander senkrechten Axialebenen verschieden, eine Unregelmäßigkeit, die beim Menschen zuweilen vorkommt (Astigmatismus) und unangenehme Störungen beim Sehen zur Folge hat.

Die Linse des Wirbeltierauges besteht aus einem Linsenkörper und einem ihn auf der cornealen Seite überziehenden einschichtigen Linsenepithel. Die hintere (vitrale) Wand des embryonalen Linsensäckchens bildet die Grundlage für den Linsenkörper; er wächst durch Wucherung der epithelialen Zellen im Aequator der Linse. Die Zellen des Linsenkörpers werden zu Linsenfasern umgebildet, indem sie sich in die Länge strecken, abflachen und eine Art Verhornungsprozeß durchmachen, wobei der Kern allmählich zugrunde geht. Dadurch, daß bei der Zellwucherung im Linsenäquator meridional angeordnete Reihen von Zellen entstehen, die sich zu Linsenfasern auswachsen, sind die Linsenfasern in Form radiär gestellter Lamellen angeordnet (Fig. 78); die Zahl dieser Lamellen der Linse ist für die einzelnen Tierarten charakteristisch (z. B. Spinax etwa 1200, Triton cristatus 100, Rana fusca um 900, Lacerta viridis 135, Fringilla coelebs 433, Mensch etwa 2200). Außen ist die Linse von einer derben Membran, der Linsenkapsel, umgeben. Im einzelnen weichen die Linsen verschiedener Wirbeltiere in Form, Härte und Beschaffenheit des Linsenepithels vielfach ab, und die Besonderheiten sind von ökologischer Bedeutung: „in der Linse spiegelt sich die ganze Lebensweise eines Tieres" (Rabl). Bei den meisten Wassertieren (Fischen und Wassersäugern), wo die Brechkraft der gewölbten Hornhaut fast gar nicht in Betracht kommt, ist die Linse nahezu kugelig und stark erhärtet, wobei die Brechkraft ihrer Substanz zunimmt. Auch bei den Amphibien, wo die Hornhaut flach ist, hat die Linse ganz oder nahezu Kugelgestalt; sie ist bei der wasserbewohnenden Kaulquappe stärker gewölbt als bei dem luftbewohnenden Frosch. Säuger, und besonders Sauropsiden, haben Linsen aus weicherer Masse; bei den meisten Sauropsiden, besonders den Vögeln, ist das Linsenepithel in seinen Randteilen, also vor dem Uebergang in den Linsenkörper, sehr hoch und bildet den sogenannten Ringwulst (Fig. 79), der wahrscheinlich bei der Gestaltveränderung der Linse von Wichtigkeit ist. Die Befestigung der Linse wurde oben schon geschildert.

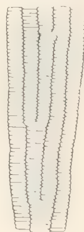


Fig. 78. Stück eines äquatorialen Schnittes durch die Linse des Frosches (Rana fusca); zeigt die Anordnung der Linsenfasern. Nach Rabl.

Mit der Verschiedenheit in der Beschaffenheit der Linsen steht die Verschiedenheit in der Akkommodationsweise bei den Wirbeltieren im engsten Zusammenhang. Wie schon früher erörtert, sind bei Linsenaugen zwei verschiedene Methoden der Akkommodation möglich, durch Veränderung des Abstandes zwischen Linse und Netzhaut, und durch Veränderung der Linsenwölbung. Beide kommen bei den Wirbeltieren vor, und zwar akkommodieren die Fische und Amphibien auf die erstere, Sauropsiden und Säuger auf die letztere Weise. Bei den Fischen geschieht die Akkommodation derart, daß die nur dorsal durch ein Band aufgehängte Linse der Netzhaut genähert wird durch Zusammenziehung des ventral in der Richtung des embryonalen Augenspalts gelegenen Rückziehmuskels (Musculus retractor lentis), dessen Sehne an die Linse ansetzt.

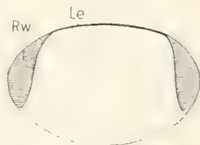


Fig. 79. Linse der Taube. Im Medianschnitt. Le Linsenepithel, Rw Ringwulst (die Schraffierung desselben ist viel grober als die Zellanordnung). Nach Rabl.

Das ruhende Auge ist also für die Nähe eingestellt und akkommodiert für die Ferne. Die Ausschaltung der Cornea beim Wasserleben verlangt große Brechkraft der Linse, welche dabei starr wird und keiner Gestaltveränderung fähig ist. Bei den Haien, die sich hauptsächlich durch ihren chemischen Sinn orientieren, ist der Akkommodationsapparat schwach ausgebildet. — Bei den Amphibien wird die gestaltlich unveränderte Linse durch Muskelzug von der Netzhaut entfernt, das Auge also für die Nähe eingestellt; die Muskeln sind bei den Anuren ein dorsaler und ein ventraler Musculus protractor lentis, der bei Kröten kräftiger ist als bei Fröschen; den Schwanzlurchen kommt nur ein ventraler derartiger Muskel zu. — Bei den Sauropsiden wird die Linse in ihrer Vorderfläche bedeutend stärker gewölbt durch den Druck, den die Zusammenziehung der Ciliar- und Irismuskeln auf sie ausübt, und dadurch wird das Auge, das in der Ruhe für ferne Gegenstände eingestellt ist, für die Nähe akkommodiert. Die Akkommodationsmuskulatur ist bei den Sauropsiden quergestreift, während sie bei allen übrigen Wirbeltieren glatt ist; das zeugt für die hohe Leistungsfähigkeit dieser Muskeln. — Die Säuger dagegen akkommodieren aktiv für die Nähe in der Weise, daß durch Kontraktion der Ciliarmuskeln das Strahlenbändchen gelockert und dadurch die Linse aus der Spannung gelöst wird, in der sie durch die Anspannung der Zonulafasern gehalten ist; infolge ihrer Elastizität nimmt sie dann ihre stärker gewölbte Eigenform an. Dadurch, daß mit zunehmendem Alter die Linse ihre Elastizität allmählich verliert, erklärt sich die verminderte Akkommodationsfähigkeit, die beim Menschen im Alter eintritt (Presbyopie), während Kurzsichtigkeit (Myopie) und Weitsichtigkeit (Hypermetropie) durch Fehler im Bau des Auges (zu große und zu geringe Entfernung der Linse von der Netzhaut) bedingt werden. — Die Akkommodationsbreite, d. h. der Unterschied zwischen Ruhezustand und stärkster Akkommodation, ist bei den verschiedenen Tieren verschieden. Die meisten Säuger, die sich vorwiegend durch den Geruch orientieren, haben eine geringe Akkommodationsbreite, nur bei den mikrosmatischen Affen und Menschen erreicht sie einen hohen Betrag. Dagegen haben die Sauropsiden (mit Ausnahme der Schlangen) im allgemeinen eine große Akkommodationsbreite. Da im Wasser die lichtbrechende Wirkung der Hornhautwölbung fortfällt, reicht für Lufttiere die akkommodative Steigerung der Brechkraft der Linse meist nicht aus, um unter Wasser deutlicher zu sehen. Deshalb ist bei manchen amphibisch lebenden Tieren, die sowohl im Wasser als in der Luft deutlich sehen, z. B. bei der Sumpfschildkröte, dem Kormoran, dem Fischotter, die Akkommodation besonders ausgiebig.

Die Iris ist wichtig für die Regulierung der in das Auge eintretenden Lichtmenge; sie ist mit einer Muskulatur versehen, durch welche die Pupille verengert und erweitert werden kann, einem starken ringförmigen Schließmuskel und einem schwächeren Oeffner (Dilatator), der aus radiären, dem epithelialen Anteil der Iris unmittelbar aufliegenden und genetisch zu diesen Zellen gehörenden Muskelfasern besteht. Bei großer Lichtfülle verengert sich die Pupille, bei geringer dagegen erweitert sie sich reflektorisch. Bei nächtlich lebenden Tieren ist die Pupille oft schlitzförmig (Kreuzotter, Katze, Fuchs) und kann dann fast bis zu völligem Verschluß verengert werden. Die starke Muskulatur, die sich bei Sauropsiden in der Iris findet, dient nicht der Irisbewegung, sondern der Akkommodation (Druck auf die Linse).

Die Versorgung des Auges mit Blut ist verschieden. Im embryonalen Auge tritt an der tiefsten Stelle des Augenspaltes, also an der Stelle des Sehnervenaustrittes, ein zuführendes Blutgefäß in das Auge, die Arteria centralis retinae, welche ein vor der Netzhaut gelegenes Capillarnetz versorgt und sich auch hinter der Linse in Capillaren auflöst. Diese Arterie schwindet im fertigen Auge und es bleibt als Rest von ihr im Glaskörper ein besonders modifizierter, mit Flüssigkeit erfüllter Gang, der Canalis hyaloideus. Die Netzhaut wird bei den meisten Wirbeltieren im erwachsenen Zustand nur von den Blutgefäßen der Chorioidea aus ernährt; das im embryonalen Auge der Netzhaut vitral aufliegende Capillarnetz ist beim fertigen Auge geschwunden. Nur bei den Säugern (und beim Aal) hat die Netzhaut eigene Gefäße, die in sie eindringen. Der Ernährung des Glaskörpers und der Regulierung des intraokularen Druckes dienen die reichlichen Gefäßnetze, die auf der vitralen Seite des Ciliarkörpers (in dessen Falten) und bei den Sauropsiden in dem durch den Retinaspalt eingewucherten, dem Sehnervenaustritt benachbarten Zapfen (Reptilien) oder dem zur Oberflächenvergrößerung wellblechartig gefalteten Kamm oder Pecten (Vögel) sich ausbreiten.

Eine eigenartige Form haben die Augen bei manchen Fischen der Tiefsee angenommen: der Augapfel ist zylindrisch gestaltet, die Netzhaut bildet die Grundfläche des Zylinders, und die kugelige Linse hat denselben Durchmesser wie der Zylinder, so daß sie ihn völlig ausfüllt, überzogen von der halbkugeligen Cornea. Man nennt sie Teleskopaugen (Fig. 80). Diese Gestalt ist wohl so zu erklären: bei schwachem Licht ist es ein Vorteil, wenn die Linse möglichst groß ist, damit möglichst viele der von einem Lichtpunkt ausgehenden Strahlen auf

der Netzhaut vereinigt werden. Eine große Linse hat aber bei gleicher Form und Substanz eine entsprechend größere Brennweite und es müßten die Ausmaße des Auges, wenn es nach allen Richtungen gleichmäßig vergrößert werden sollte, sehr groß werden und es würde daher am

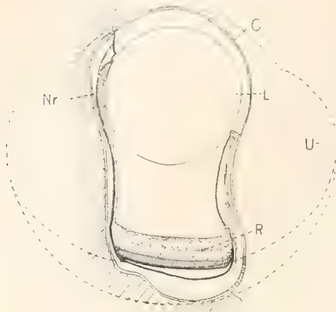


Fig. 80. Teleskopauge des Tiefseefisches Argyropelecus. Im Medianschnitt. C Cornea, L Linse, R Retina, Nr Nebenretina (vgl. Fig. 57). U Umriß eines gewöhnlichen Fischauges mit gleichgroßer Linse. Nach Brauer (und Franz).

Kopf des Tieres oft gar keinen Platz finden. Es wird daher nur die Längendimension vergrößert, nicht auch die Breitendimension. Ebenso ist die ähnliche Gestalt der Augen bei einem Tiefseecephalopoden (Amphitretus) und bei den Schwimmschnecken (Carinaria, Pterotrachea) zu erklären, bei welch letzteren seitliche „Fenster" (pigmentfreie Stellen) in der Augenwand eine Konzentration reichlichen Lichtes auf der Netzhaut notwendig machen, damit dort ein genügend lichtstarkes Bild entsteht.

Die Augen stehen am Kopf gewöhnlich so, daß ihre Achsen seitlich gerichtet sind und in der Horizontalebene liegen; bei manchen grundbewohnenden Fischen (Angler, Petermännchen u. a.) stehen die Achsen senkrecht. Bei den Säugern sind die Abweichungen von der seitlichen Richtung der Achsen sehr zahlreich und alle Uebergänge vorhanden bis zur Richtung parallel nach vorn wie beim Menschen.

Hilfsapparate der Augen: Um die Augen wird von der Schädelkapsel aus eine schützende Hülle gebildet, welche sie mehr oder weniger weit umgreift, so daß die Augenhöhle (Orbita) zustandekommt. In dieser wird das Auge durch eine Anzahl Muskeln bewegt, deren mindestens 6, oft 7 vorhanden sind: es sind 4 gerade und 2 schiefe Augenmuskeln (Mm. recti und obliqui); die geraden Muskeln entspringen von der Augenhöhlenwand im Umkreis des Sehnervendurchtritts und setzen oben, unten vorn und hinten etwa im Aequator an die Sklera an; die schiefen Muskeln entspringen im allgemeinen von der vorderen Wand der Augenhöhle, und setzen oben und unten an der Sklera an. Bei Amphibien, Reptilien, Vögeln und vielen Säugern (Monotremen, Beutlern, Nagern, Edentaten, manchen Huftieren) kommt dazu noch der Augenrückziehmuskel (Musculus retractor bulbi), der nach innen vom Kreise der geraden Augenmuskeln entspringt und den Sehnerven scheidenförmig umhüllt.

Die äußere Haut bildet am Rande der Augenhöhle eine Ringfalte, die Bindehaut (Conjunctiva), die dem Auge locker anliegt und freie Bewegungen gestattet. Der obere und untere Rand dieser Falte sind bei den luftlebenden Wirbeltieren zum oberen und unteren Augenlid gestaltet, von denen das unterste stets, das obere besonders bei den Säugern durch eine eigene Muskulatur beweglich ist; sie dienen zur Sicherung des Auges, über dem sie sich schließen können. Bei den Schlangen sind oberes und unteres Augenlid miteinander verwachsen und bilden eine durchsichtige Lamelle vor dem Auge, die sogenannte Brille. Zu den horizontalen Lidern kommt bei manchen Haien und bei den Luftwirbeltieren noch eine bewegliche Falte der Bindehaut, die Nickhaut, die durch einen besonderen Muskelapparat über die Vorderfläche des Auges herübergezogen wird und diese reinigt und mit dem Sekret der Augendrüsen benetzt. Die Nickhaut schließt sich bei den anuren Amphibien an das untere Augenlid an, sonst sitzt sie im vorderen Winkel des Konjunktivalraumes. Bei den Säugern ist sie mehr oder weniger rudimentär (am besten beweglich bei Huftieren) und ihre Funktion wird durch das obere Augenlid übernommen.

In den Konjunktivalraum münden bei den Luftwirbeltieren zweierlei Drüsen, die als Hardersche und Tränendrüse unterschieden werden. Jene steht in Beziehung zur Nickhaut und kann ganz fehlen, wo diese rückgebildet wird. Die Tränendrüse ist bei den niederen Wirbeltieren klein und bei den Säugern am besten ausgebildet; bei Froschlurchen und Schlangen fehlt sie. Das Sekret der Tränendrüsen wird durch einen besonderen Gang abgeleitet, der den Konjunktivalraum mit der Nasenhöhle verbindet, den Tränennasengang.

Dem gleichen Mutterboden wie die Netzhaut des Wirbeltierauges entstammt bei einigen Wirbeltieren ein Organ, das mit größter Wahrscheinlichkeit auch als Sehorgan aufgefaßt wird, das Parietalauge. Es ist ein Epithelbläschen, das durch eine mediane Ausstülpung des Zwischenhirndaches gebildet wird, und dessen distale Wand, aus indifferenten Epithelzellen betehend, manchmal linsenartig verdickt ist, während die proximale Wand zwischen Stützzellen primäre Sinneszellen mit stäbchenartigen Bildungen enthält. Ueber dem Organ ist das Schädeldach äußerst verdünnt oder ganz durchbrochen und die Haut pigmentfrei, so daß das Licht ungehinderten Zutritt zu den Sinneszellen hat. In einem solchen Zustand, der auf eine Funktionsfähigkeit der Organe als Sehorgan schließen läßt, finden sich diese bei den Neunaugen (Petromyzonten), sowie bei der altertümlichen

Brückenechse (Hatteria) und manchen Sauriern (Blindschleiche, Zauneidechse). Bei den Neunaugen (Fig. 81, A) sind zwei solche

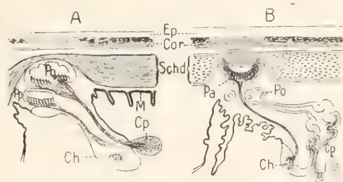


Fig. 81. Parietalaugen vom Neunauge (Petromyzon, A) und der Blindschleiche (B), schematisch. Ep Epidermis, Cor Corium, mit eingelagertem Pigment, Schd Schädeldach; Pa Parietalauge, Po Pinealorgan, Pp Parapinealorgan, Ch Commissura habenulae, Cp Commissura posterior, M Mittelhirndach. Nach Studnicka.

Bläschen vorhanden, jedes mit Sinneszellen, die ihre Nervenfasern bei dem vorderen, dem Parapinealorgan, zur Commissura habenularis, bei dem hinteren, dem Pinealorgan, zur Commissura posterior senden. Bei den Sauriern (Fig. 81, B) kommt nur ein solches Sehorgan vor, und dieses schickt seine Nervenfasern zur Commissura habenularis, ist also mit dem Parapinealorgan von Petromyzon vergleichbar; die distale Zellwand des Bläschens bildet bei der Blindschleiche und bei Varanus eine Linse. Das Pinealorgan (die Zirbeldrüse), das bei den Sauriern seine Nervenfasern zur Commissura posterior sendet, ist nicht augenähnlich ausgebildet. In der Vorzeit hatte das Parietalauge wahrscheinlich eine viel weitere Verbreitung; die Parietallöcher, die man in den Schädeln vieler ausgestorbener Amphibien und Reptilien findet, weisen auf ein funktionierendes Parietalauge hin, das in ihnen lag.

Literatur. **Th. Beer,** *Studien über die Akkommodation der Wirbeltieraugen, in Pflügers Archiv, Bd.* 53, 58, 67, 69, 73, *1893 bis 1898.* — **Derselbe,** *Ueber primitive Sehorgane, in der Wiener klinischen Wochenschrift, Jahrgang 1901, Nr.* 11, 12, 13. — **Beer, Bethe und v. Uexküll,** *Vorschläge zu einer objektivierenden Nomenklatur in der Physiologie des Nervensystems. Biolog. Centralbl.* 29, *S. 517, 1899.* — **E. Botezat,** *Die Nervenendapparate in den Mundteilen der Vögel, in d. Zeitschr. f. wiss. Zoologie* 84, *S. 205, 1906.* — **C. Chun,** *Atlantis. Biologische Studien über pelagische Organismen, in der Bibliotheca zoologica, 19. Heft, 1896.* — **R. Demoll,** *Die Physiologie des Facettenauges, in: Ergebnisse und Fortschritte der Zoologie* 2, *S. 431, 1910.* — **A. S. Dogiel,** *Ueber die Nervenendapparate in der Haut des Menschen, in d. Zeitschr. f. wiss. Zoologie* 75, *S. 46, 1903.* — **S. Exner,** *Die Physiologie der facettierten Augen von Krebsen und Insekten. Leipzig und Wien 1891.* — **A. Forel,** *Das Sinnesleben der Insekten. München 1910.* — **M. v. Frey,** *Physiologie der Sinnesorgane der menschlichen Haut, I. Temperatursinn, in: Ergebnisse der Physiologie* 9, *S. 351, 1910.* — **V. Graber,** *Die chordotonalen Sinnesorgane der Insekten, im Archiv für mikroskopische Anatomie* 20, *S. 506 und* 21, *S. 65, 1882.* — **H. Grenacher,** *Untersuchungen über das Sehorgan der Arthropoden. Göttingen 1879.* — **Derselbe,** *Abhandlungen zur vergleichenden Anatomie des Auges, I u. II, in den Abhandlungen der naturforschenden Gesellschaft zu Halle* 16, *S. 209 und* 17, *S. 1, 1886 und 1888.* — **C. Hess,** *Vergleichende Physiologie des Gesichtssinns, im Handbuch der vergleichenden Physiologie, herausgeg. von Winterstein, Bd.* 4, *1912; auch einzeln.* — **R. Hesse,** *Untersuchungen über die Organe der Lichtempfindung bei niederen Tieren, I bis VIII, in d. Zeitschr. f. wiss. Zoologie* 61, 62, 63, 65, 68, 70, 72, *1896 bis 1902.* — **Derselbe,** *Das Sehen der niederen Tiere. Jena 1907.* — **B. Hofer,** *Studien über die Hautsinnesorgane der Fische. I. Die Funktionen der Seitenorgane bei den Fischen, in den Berichten der bayerischen biologischen Versuchsstation in München* 1, *S. 115, 1907.* — **A. v. Kölliker,** *Handbuch der Gewebelehre des Menschen, Bd.* 1 *und* 3. *Leipzig 1889 und 1902.* — **A. Kreidl,** *Beiträge zur Physiologie des Ohrlabyrinths,* 2. *Versuche an Krebsen, in den Sitzungsberichten der Akademie der Wissenschaften Wien, Jahrg. 1893.* — **Derselbe,** *Ueber die Perzeption der Schallwellen bei Fischen, in Pflügers Archiv* 61, *S. 450 und* 63, *S. 581, 1895 f.* — **A. Lang,** *Ob die Wassertiere hören? Mitteilungen der naturforschenden Gesellschaft in Winterthur, 1903.* — **M. v. Lenhossék,** *Ursprung, Verlauf und Endigung der sensibeln Nervenfasern bei Lumbricus, im Arch. f. mikrosk. Anatomie* 39, *S. 102, 1892.* — **R. Leuckart,** *Organologie des Auges, in Graefe-Saemischs Handbuch der gesamten Augenheilkunde, 1. Aufl., 2. Bd., 1876.* — **F. Merkel,** *Ueber die Endigung der sensibeln Nerven in der Haut der Wirbeltiere. Rostock 1880.* — **W. A. Nagel,** *Vergleichende physiologische und anatomische Untersuchungen über den Geruchs- und Geschmackssinn und ihre Organe, in der Bibliotheca zoologica, 15. Heft, 1894.* — **A. Pütter,** *Organologie des Auges, in Graefe-Saemischs Handbuch der gesamten Augenheilkunde, 3. Aufl., 1912.* — **S. Ramon y Cajal,** *Die Retina der Wirbeltiere. Wiesbaden 1894.* — **O. vom Rath,** *Zur Kenntnis der Hautsinnesorgane und des sensibeln Nervensystems der Arthropoden, in d. Zeitschr. f. wissensch. Zool.* 61, *S. 499, 1896.* — **G. Retzius,** *Das Gehörorgan der Wirbeltiere, I. u. II. Stockholm 1881 und 1884.* — **Derselbe,** *Biologische Untersuchungen, N.F. 1ff., 1890f.* — **J. Schwabe,** *Beiträge zur Morphologie und Histologie der tympanalen Sinnesorgane der Orthopteren, in der Bibliotheca zoologica, Heft* 50, *1906.* — **K. A. Studnicka,** *Die Parietalorgane, in A. Oppels Lehrbuch der vergleichenden mikroskopischen Anatomie, Tl.* 5, *1905.* — **M. Verworn,** *Gleichgewicht und Otolithenorgan, in Pflügers Archiv* 50, *S. 423, 1811.*

R. Hesse.

Sinnesorgane.

Physiologie der Sinnesorgane.

1. Definition. 2. Psychophysischer Parallelismus. 3. Die spezifische Disposition. 4. Die spezifische Energie der Sinnesorgane. 5. Die „fünf Sinne“. 6. Qualitäten und Modalitäten. 7. Einfache und zusammengesetzte Empfindungen. 8. Die Zahl der Sinne des Menschen. 9. Die Leistungen der Sinne. 10. Die Eigenschaften der Empfindungen. 11. Objektive Kriterien der Sinnestätigkeit. 12. Die Sinnesorgane und ihre Hilfsapparate. 13. Vergleichende Sinnesphysiologie: a) Der Lichtsinn. b) Die Tastsinne. c) Der statische Sinn. d) Der Gehörsinn. e) Temperatursinne. f) Chemische Sinne.

1. Definition. Als „Sinnesorgane“ bezeichnen wir beim Menschen Organe, welche auf dem Wege des Nervensystems den nervösen Zentren Erregungen zusenden, von denen wir durch Empfindungen Kunde erhalten. Wir unterscheiden an einem vollständigen Sinnesapparat das periphere Sinnesorgan, die nervöse Leitungsbahn und das zentrale Ende derselben in Ganglienzellen, deren eine in der Großhirnrinde gelegen ist. Gleichzeitig mit der Erregung dieser letzteren tritt die Sinnesempfindung auf. Die Empfindung, die wir subjektiv haben, ist der feinste und in vielen Fällen der einzige Ausdruck der Tätigkeit eines Sinnesorgans, der unserer Untersuchung zugänglich ist, und ist gleichzeitig dasjenige, was die funktionelle Bedeutung der Sinnesorgane ausmacht: Die Sinnesorgane vermitteln Empfindungen, deren Gesamtheit das Material darstellen, mit dessen Hilfe wir die Vorstellung unseres eigenen Körpers und seiner Bewegungen gewinnen und ebenso diejenige des Raumes außerhalb unseres Körpers und der ihn erfüllenden verschiedenartigen Objekte, die in der Zeit Veränderungen erleiden können.

Da die Frage, ob ein Organ Empfindungen vermittelt, nur durch die subjektive Erfahrung entschieden werden kann, so ist eine Definition der Sinnesorgane als empfindungsvermittelnde Organe nur für den Menschen brauchbar. Der Versuch einer Definition, die für die Zwecke einer vergleichenden Physiologie der Sinne hinreicht, soll erst weiter unten gemacht werden.

2. Psychophysischer Parallelismus. Die physiologischen Vorgänge in den Ganglienzellen der Sinneszentren und die Empfindungen, welche wir subjektiv wahrnehmen, wenn eine solche Zelle in Tätigkeit tritt, sind völlig unvergleichbar miteinander. Wenn wir trotzdem zur Erforschung der Lebensvorgänge in den Sinnesorganen als feinstes Hilfsmittel die Empfindungen benutzen, so muß eine Beziehung zwischen diesen beiden Größen bestehen. Wir bezeichnen diese Beziehung als den psychophysischen Parallelismus und wollen damit ausdrücken, daß eine, ihrem Wesen nach völlig unbekannte Naturnotwendigkeit die beiden unvergleichbaren und nicht aufeinander zurückführbaren Reihen von Vorgängen, die materiellen Veränderungen in den Ganglienzellen und die Empfindungen verknüpft, und zwar so, daß ein bestimmter Vorgang der einen Reihe stets gleichzeitig mit einem bestimmten Vorgang der anderen Reihe erfolgt.

3. Die spezifische Disposition. Die Erregungen der Ganglienzellen, welche uns hier beschäftigen, sind bedingt durch die Impulse, welche ihnen durch die Sinnesnerven zufließen und deren Erregung wiederum ist bedingt durch die Erregungen der peripheren Sinnesorgane, welche durch Reize von außen bedingt sind. Die Reize, auf welche Sinnesorgane reagieren, sind dieselben, welche allgemein als Reize für die lebendige Substanz wirksam sind, und wir teilen sie nach physikalisch-chemischen Gesichtspunkten ein. So wirken als Reize für die Sinnesorgane Licht, Schall, Berührung, Temperatur und die chemische Beschaffenheit vieler Stoffe. Dabei ergibt sich eine besondere Eigentümlichkeit der Sinnesorgane, die wir als ihre spezifische Disposition (Nagel) bezeichnen und die darin besteht, daß die Erregbarkeit eines Sinnesorganes für einen bestimmten Reiz eine unvergleichlich viel größere ist, als für alle anderen Reizarten. Diesen Reiz nennen wir den adäquaten Reiz und zu seiner Aufnahme dient das Sinnesorgan.

4. Die spezifische Energie. Nicht zu verwechseln mit dieser Eigenschaft ist eine andere, die man seit Johannes Müller als die spezifische Energie der Sinnesorgane bezeichnet. Da der Begriff „Energie“ in diesem Zusammenhange in ganz anderer Bedeutung gebraucht ist, als wie sie uns heute geläufig ist, so könnte der Ausdruck mißverstanden werden, doch ist er zu fest eingebürgert, um ihn leicht entbehren zu können. Die Tatsachen, welche mit dem Begriff zusammengefaßt werden sollen, und deren Kenntnis fundamental für das Verständnis der Leistungen der Sinnesorgane ist, sind folgende:

1. Die für jedes Sinnesorgan eigentümlichen Empfindungen können durch verschiedene äußere Reize und ebenso durch innere Zustände des eigenen Körpers ausgelöst werden. Ob eine Geschwulst den Gehirnteil des Sehnerven drückt, ob sein Augenhöhlenteil gezerrt oder der Augapfel elektrisch gereizt wird, oder ob strahlende Energie ins Auge gelangt; immer haben wir die Empfindung des Lichtes.

2. Derselbe äußere Reiz kann in den verschiedenen Sinnesorganen verschiedene Empfindungen auslösen: der elektrische Strom wird im Auge als Licht empfunden, auf die

Bogengänge des inneren Ohres wirkend, ruft er die Empfindung des Drehschwindels hervor, auf der Haut wird er als Berührung eventuell als Schmerz empfunden, und auf der Zunge als sauer (Anode) oder scharf, zuweilen etwas bitterlich (Kathode).

3. Wir können durch äußere Reize keine Arten von Empfindungen haben, die wir nicht auch ohne äußere Reize durch Empfindung der Zustände unserer Nerven haben können.

5. Die „fünf Sinne". Die Frage, wie viele Sinne der Mensch hat, ist bis in die neuere Zeit hin stets mit der Schulweisheit beantwortet worden: der Mensch hat fünf Sinne, und zwar Gesicht, Gehör, Geruch, Geschmack und Gefühl. Das Einteilungsprinzip ist hierbei — bewußt oder unbewußt — ein anatomisches und gründet sich auf die verschiedenen, äußerlich erkennbaren Sinnesorgane: Auge, Ohr, Nase, Mund und Haut; aber eine etwas nähere kritische Ueberlegung zeigt bald das Unzulängliche einer solchen Einteilung. Das Auge freilich ist ungeteilt das Organ des Gesichtssinnes, aber schon im Ohr haben wir anatomisch vereinigt das Gehörsorgan und die Bogengangsapparate, die Sinnesorgane zur Empfindung von Drehungen des Kopfes sind und mit dem Gehör nichts zu tun haben. In den Schleimhäuten der Nase und des Mundes liegen außer den Endorganen der chemischen Sinne auch Tastnerven, welche keinerlei Geruchs- oder Geschmacksempfindung vermitteln und in der äußeren Haut kennen wir sicher vier verschiedene Sinnesorgane, die als Kälte-, Wärme-, Druck- und Schmerzsinn bezeichnet werden. Mit einer Einteilung der Sinne des Menschen nach der Fünfzahl kommen wir also keineswegs aus. Es nützt aber auch nichts, die Zahl unter Beibehaltung anatomischer Merkmale als Einteilungsprinzip zu vermehren, denn wir wissen durchaus nicht, welche Eigenschaften im gröberen oder feineren Bau die einzelnen (peripheren) Sinnesorgane haben, z. B. sind wir für die vier Sinne der Haut, die man früher als „Gefühl" bezeichnete, absolut nicht imstande besondere anatomische Merkmale anzugeben. Die Unterscheidung dieser Sinne gründet sich auf physiologische Versuche.

6. Qualitäten und Modalitäten. Wenn wir die Sinnesorgane definieren als Organe, welche Empfindungen vermitteln, so muß ihre Einteilung auch auf die Verschiedenheit der Empfindungen begründet werden, welche sie auslösen.

Empfindungen unterscheiden sich nach ihrer Intensität, ihrer Dauer, ihrem Lokalzeichen, ihrem Gefühlston und besonders ihrer Qualität. Dieser letztere Unterschied ist nicht zu definieren oder zu beschreiben, ebensowenig wie die Empfindung selbst, wir verstehen aber alle, was gemeint ist, wenn wir sagen, die Qualität ist das Eigentümliche, wodurch sich eine Farbe von einem Ton, ein Geruch von einer Berührungsempfindung oder eine Farbe von einer anderen, ein Ton von einem anderen unterscheiden (Oehrwall).

Es gibt nun, wie Helmholtz ausgeführt hat, in bezug auf die Qualität zwei Grade von Unterschieden zwischen verschiedenen Empfindungen. Eine Farbe kann mit einer anderen Farbe verglichen werden, nicht aber mit einem Ton. Von einer Farbe kann man durch eine ununterbrochene Reihe von verschiedenen Farben zu jeder beliebigen anderen Farbe kommen, ebenso von jedem Ton zu jedem anderen; man kann aber auf diese Weise nicht von einer Farbe zu einem Ton gelangen. Die Qualitäten aller Farben oder aller Töne bilden zusammen einen Qualitätenkreis oder, wie Helmholtz es nennt, eine Modalität, und dieser Begriff der Modalität deckt sich mit dem physiologischen Begriff des Sinnes.

Wir haben so viele Sinne, als wir verschiedene Sinnesmodalitäten empfinden können, ein Sinn ist ein Kreis einfacher Empfindung.

7. Einfache und zusammengesetzte Empfindungen. Die erste Aufgabe zur Beantwortung der Frage nach der Zahl der Sinne des Menschen ist also die, festzustellen, wie vieler verschiedener einfacher Empfindungen wir fähig sind. Die Entscheidung, ob eine Empfindung einfach oder zusammengesetzt ist, erfordert häufig eine besondere wissenschaftliche Analyse, die noch bei weitem nicht für alle Empfindungen durchgeführt ist.

Jeder musikalische Klang setzt sich aus Tönen zusammen, die das Ohr heraushören kann — um so leichter, je besser es musikalisch geschult ist —, jeder Ton ist eine einfache Empfindung. Die Farben enthalten als physikalische Komponenten Licht verschiedener Wellenlänge, aber dies zu erkennen, ist unser Auge nicht imstande. Vom sinnesphysiologischen Standpunkte aus ist jede Farbe eine einfache Empfindung: wir können an weißem Licht nicht erkennen, ob es aus der Mischung aller Farben des Spektrums besteht, wie das Tageslicht, oder nur aus der Mischung zweier Komplementärfarben. Der sogenannte scharfe „Geschmack" des Pfeffers ist keine einfache Empfindung, sondern setzt sich zusammen aus einer brennenden Tastempfindung auf der Zunge und einem aromatischen Geruch, eine Geschmacksempfindung kommt als Komponente dieser zusammengesetzten Empfindung überhaupt nicht vor.

Außer den Empfindungen, die wir auf äußere Objekte beziehen, haben wir aber noch eine ganze Anzahl von Empfindungen, die

uns eine Vorstellung vom Zustande unseres eigenen Körpers vermitteln. Diese Empfindungen, wie Hunger, Durst, Müdigkeit, Jucken, Harn- und Stuhldrang werden gewöhnlich mit dem verschwommenen Begriff „Gemeingefühle" bezeichnet, aber sie sind ebensogut Empfindungen wie Geruch und Geschmack, und diejenigen von ihnen, welche sich bei näherer Analyse als einfache Empfindungen herausstellen, müssen als die Leistungen eigener innerer Sinne neben die äußeren Sinne gestellt werden. Der Umstand, daß wir für diese Art von Sinnen weder die adäquaten Reize noch die Sinnesorgane mit einiger Sicherheit anzugeben vermögen, ist kein hinreichender Grund, sie bei einer systematischen Einteilung der Sinne überhaupt zu vernachlässigen.

8. **Die Zahl der Sinne des Menschen.** Bei einer Aufzählung der Sinne des Menschen wollen wir zunächst die äußeren und inneren Sinne unterscheiden. Nur für die ersteren können wir etwas Genaueres über ihre Zahl sagen. Seit langem ist es üblich, den Gesichtssinn und Gehörssinn als die „höheren" Sinne, allen anderen sogenannten „niederen" Sinnen gegenüberzustellen, eine Einteilung, die durch eine Reihe von Momenten gerechtfertigt erscheint.

Innerhalb des Gesichtssinnes — der Modalität der Gesichstsempfindungen — unterscheiden wir die Qualitäten der Farben und zwar der ungetonten Farben vom reinen Weiß durch alle Arten des Grau zum reinen Schwarz, sowie der getonten Farben, wie sie das Spektrum enthält und die durch die Purpurtöne zwischen Violett und Rot zu einem Kreise geschlossen werden. Innerhalb der Modalität der Gehörsempfindungen bilden die Töne vom tiefsten zum höchsten die Qualitäten.

Bei den niederen Sinnen vermissen wir innerhalb einer Modalität eine weitere Mannigfaltigkeit von Qualitäten völlig, oder es ist (beim Geruchssinn) wenigstens nicht sicher, ob eine derartige Mannigfaltigkeit besteht. Hier ist also jede Qualität gleichzeitig eine Modalität. Was die Zahl der Modalitäten anlangt, so haben wir zu unterscheiden: den Kältesinn und den Wärmesinn, deren Organe in der Haut und der Mundschleimhaut liegen, den Tastsinn, der vielleicht noch in einen Druck- und Stoßsinn wird geteilt werden müssen, und der gleichfalls der Haut und verschiedenen Schleimhäuten zukommt, und die große Gruppe der chemischen Sinne.

Wieviele chemische Sinne wir besitzen läßt sich zurzeit nicht mit Sicherheit sagen. Unter den alten Bezeichnungen „Geruch" und „Geschmack" sind je mehrere Sinne zusammengefaßt. Die Zahl der Geschmackssinne beträgt vier und zwar sind als eigene Modalitäten (Sinne) scharf unterscheidbar: der Süßsinn, Bittersinn, Salzigsinn und Sauersinn. Es ist hiermit — entgegen der landläufigen Auffassung von der ungeheueren Mannigfaltigkeit der Geschmackseindrücke — die Mannigfaltigkeit des Geschmackes erschöpft. Alles, was wir im täglichen Leben als Geschmack bezeichnen und was nicht unter die vier genannten Modalitäten fällt, gehört in das Gebiet der Geruchssinne oder beruht auf Beimischung von Tastempfindungen zu Geschmacks- oder Geruchssensationen. So werden die Blume des Weins, das Aroma des Käses, der Geschmack der Zwiebel usw. nicht geschmeckt, sondern gerochen, was äußerst einfache Versuche, bei denen mit verschlossener Nase geschmeckt wird, leicht und häufig zum größten Erstaunen der Versuchspersonen, lehren. Die Geruchssinne — beim Menschen weniger hoch entwickelt als bei vielen Tieren — stellen trotzdem die mannigfaltigste Gruppe der menschlichen Sinne dar, doch können wir zurzeit nicht auch nur mit einiger Sicherheit sagen, wieviele Modalitäten hier voneinander trennbar sind, wieviele Geruchssinne der Mensch hat. Zwaardemaker unterscheidet neun Komponenten, die man als getrennte Sinne auffassen könnte, doch darf diese Zahl aus mehreren Gründen nicht als endgültig betrachtet werden. Vielleicht wird sich eine noch größere Anzahl Modalitäten ergeben und eine wesentliche Verringerung der Zahl darf als unwahrscheinlich angesehen werden.

Eine eigentümliche Stellung, gewissermaßen zwischen den äußeren und inneren Sinnen, nehmen noch zwei weitere Sinne ein: der Schmerzsinn und der Sinn, der uns Drehempfindungen vermittelt (man könnte sagen der Schwindelsinn).

Daß die Schmerzempfindung nicht einfach eine Steigerung einer Berührungsempfindung, sondern eine einfache Empfindung eigener Art ist, ist jetzt wohl ziemlich allgemein anerkannt, und wir dürfen mit gutem Recht die Existenz besonderer Schmerznerven annehmen (v. Frey). So fehlt z. B. der Hornhaut des Auges die Berührungsempfindlichkeit, während sie in hohem Maße schmerzempfindlich ist. Da der adäquate Reiz für die Schmerzsinnesorgane ein äußerer Reiz ist: starke Berührung, an der Grenze des Verletzenden, so könnte man den Schmerzsinn als äußeren Sinn bezeichnen. Mit demselben Recht aber kann man ihn den inneren Sinnen zurechnen, da er uns Kunde von dem Zustande des Körpers gibt, speziell den Dienst eines Warnungssignals versieht.

Die halbkreisförmigen Kanäle (Bogengänge) des inneren Ohres vermitteln uns

die Empfindung von Drehungen, die der Kopf erfährt, eine Empfindung, die wir bei genügender Intensität als Drehschwindel bezeichnen und auch hier ist es Willkürsache, ob man diesen Sinn zu den äußeren oder den inneren rechnen will, eine Unterscheidung, der ja überhaupt nur der Wert einer oberflächlich orientierenden Einteilung zukommt. Ein Versuch, die inneren Sinne aufzuzählen, muß gegenwärtig ganz unvollständig bleiben.

Wir haben ganz bestimmte Empfindungen von der Spannung unserer Muskeln und Sehnen und von dem Druck, mit dem die Gelenkflächen der Knochen aufeinander gepreßt werden, aber es ist unsicher, wieviele Modalitäten wir hier unterscheiden dürfen und vollends für die oben angeführten Empfindungen von Hunger, Durst, Müdigkeit usw. fehlt die Analyse, welche uns entscheiden ließe, ob hier modal verschiedene einfache Empfindungen vorliegen. Wir können also auf die Frage, wieviele Sinne der Mensch hat, keine präzise Antwort geben. Rechnen wir, daß die Zahl der Geruchssinne neun ist, so hätten wir ohne die typischen inneren Sinne, deren Zahl wir auch nicht vorläufig angeben konnten, doch schon 20 Sinne zu unterscheiden.

Die Vieldeutigkeit der sprachlichen Verwendung des Wortes „Sinn" erfordert noch einige Auseinandersetzungen, die vor Mißverständnissen bewahren sollen. Man spricht von einem Raum- und Zeitsinn, von Lagesinn usw. In der oben definierten Bedeutung handelt es sich hierbei nicht um „Sinne", denn wir haben keine Organe, die uns einfache Empfindungen vermittelten, welche wir als die Elemente eines Raum- oder Zeitsinnes ansprechen könnten. Das, was wir als Raum- oder Zeitsinn bezeichnen, ist etwas äußerst verwickeltes, eine Reihe von Vorstellungen, deren Material Empfindungen aus verschiedenen Sinnesgebieten sind und die zum Teil erst auf Grund einer Reihe von psychischen Prozessen unsere Anschauungen über Raum und Zeit ermöglichen.

Auch einen einheitlichen Lagesinn, der uns die Vorstellung von der jeweiligen Lage und Stellung unseres Körpers vermittelt, gibt es nicht, es wirken zu dieser Leistung viele Sinne zusammen: z. B. beim Stehen die Tastsinnesorgane der Fußsohle, die Sinnesorgane der Gelenke, Sehnen und Muskeln, der Bogengangsapparat des inneren Ohres und die Augen, und es läßt sich leicht zeigen, daß z. B. jenes ganz ruhige gerade Stehen, wie es das Kommando „Still gestanden" in unserer Armee erfordert, nur unter Benutzung aller genannten Sinnesorgane zu erreichen ist. Schon ein Schließen der Augen hat ein leichtes Schwanken zur Folge.

Vielfach ist die Frage aufgeworfen worden, ob der Mensch nicht noch ganz andere „Sinne" besäße, die ihm Leistungen ermöglichen, wie wir sie im allgemeinen für unmöglich halten. Es handelt sich dabei im wesentlichen um Versuche, angeblich ganz rätselhafte Erscheinungen zu erklären, die als Gedankenübertragung, Gedankenlesen und dergleichen mehr von jeher und bis heute das Interesse unkritischer Köpfe besonders zu fesseln pflegen. Es kann hier auf diese Fragen, auf die niemals eine positive Antwort gegeben worden ist, nicht näher eingegangen werden, und es sei nur kurz erwähnt, daß es sich beim Gedankenlesen nur um die Auffassung kleinster unwillkürlicher Bewegungen mittels des Tastsinnes, der Sinne der Gelenke und Muskeln oder auch des Auges handelt, nicht dagegen um geheimnisvolle Leistungen besonderer Sinnesorgane, von denen wir noch nichts wissen.

9. Die Leistungen der Sinne. Eine stattliche Anzahl von Sinnen ist es, deren Qualitäten in buntester Kombination das Bild der farbigen, geformten, tönenden Welt für uns schaffen, die uns die chemische Beschaffenheit unserer Nahrung und unserer Atmungsluft beurteilen lassen, uns die Vorstellung von unserer eigenen Körperlichkeit vermitteln und uns so das Material liefern, mit dem unser Geist arbeitet, die Anregungen geben, die in mannigfachen Assoziationen verknüpft, all unser geistiges Leben bestimmen, von dem einfachen Entschluß, den Arm zu heben, bis zu der letzten Spekulation philosophischer Weltbetrachtung. Ist das nicht zuviel gesagt? Würden wir nicht noch weiter denken können, auch wenn der Strom der Sinneseindrücke versiegte, wenn das Gehirn gewissermaßen isoliert würde? Die Erfahrungen der Pathologie geben uns eine deutliche Antwort auf diese Frage: bei Wegfall aller Sinneseindrücke (auch der der inneren Sinne!) erhält sich der wache Zustand des Gehirns nicht mehr, das Gehirn fällt in Schlaf, es hat kein bewußtes Leben, keine Denktätigkeit ohne die Anregungen von außen.

Es ist ein in dieser Richtung höchst bemerkenswerter Fall beschrieben (Strümpell), bei dem der Patient nur noch auf dem rechten Auge sehen und auf dem linken Ohr hören konnte, alle anderen Sinne fehlten. Die Empfindlichkeit der Haut für Kälte, Wärme, Berührung und Schmerz war vom Hinterhaupt bis zu den Zehen geschwunden, alle zugänglichen Schleimhäute waren unempfindlich. Die Muskelempfindungen waren ebenso geschwunden wie das Ermüdungsgefühl, so daß der Patient den Arm ausgestreckt halten konnte, bis er nach Minuten unter heftigem Zittern herabsank und objektiv völlig ermüdet war, während jedes Ermüdungsgefühl fehlte. Geschmack und

Geruch wie auch die Tastempfindlichkeit der Mundhöhle waren aufgehoben: Bissen, die in den Mund geschoben wurden, wurden nicht bemerkt und erst auf Aufforderung gekaut. Es bestand auch kein Harndrang und Stuhldrang, kein Gefühl für Hunger und Durst, selbst nach völligem Fasten durch 36 Stunden. Wurden nun diesem Patienten das sehende Auge und das hörende Ohr verschlossen, so verfiel er nach 2 bis 3 Minuten in tiefen Schlaf, der stundenlang anhielt: der wache Zustand des Gehirns ist also ohne die von außen kommenden Erregungen, die die Sinnesorgane aufnehmen, nicht zu erhalten.

10. Die Eigenschaften der Empfindungen. Die Qualität der Empfindungen hängt von der Beschaffenheit unserer Sinnesorgane ab und wir können durchaus nicht angeben, warum wir die Wellenbewegungen des Aethers als strahlende Wärme oder als Licht empfinden, die Luftwellen als Schall hören, Chinin als bitter, Zucker als süß schmecken usw., sondern müssen diese Tatsachen als gegeben hinnehmen.

Anders liegen die Dinge für eine Eigenschaft, die gleichfalls jeder Empfindung zukommt, für die Intensität der Empfindung. Jede Empfindung kann innerhalb bestimmter Grenzen in ihrer Intensität variieren von einem eben merklichen Wert bis zu einer gewissen größten Intensität hin.

Im täglichen Leben schätzen wir die Stärke der äußeren Reize, welche unsere Sinnesorgane treffen, nach der Intensität der Empfindungen, welche wir haben und wenn wir von der Stärke der äußeren Reize eine exakte physikalische Kenntnis haben, so läßt sich ermitteln, ob unsere Schätzung richtig ist, oder in welcher Weise sie von der Wirklichkeit abweicht. Auf diese Weise ergibt sich die Form des Gesetzes, durch das die Intensität des Reizes und diejenige der Empfindung verknüpft sind. Das erste Phänomen, das eine solche Untersuchung im Gebiete aller Sinne lehrt, ist dies, daß es Reize gibt, denen gar keine Empfindung entspricht.

Wenn wir irgend einen Reiz, z. B. den Lichtreiz, von dem Werte Null an wachsen lassen, so haben wir zunächst keine Lichtempfindung, auch wenn, wie wir physikalisch feststellen, bereits Licht in unser Auge kommt. Wir bezeichnen die Intensität des Reizes, bei der eben eine merkliche Empfindung auftritt als den Schwellenwert des Reizes. Die Bestimmung solcher Schwellenwerte ist eine wichtige Aufgabe der Sinnesphysiologie, die uns die Leistungsgrenzen unserer Sinnesorgane erkennen läßt. Man unterscheidet dabei verschiedene Arten von Schwellen: als generelle Schwellen oder Nullschwellen bezeichnet man die eben erwähnten, in denen eine nur eben merkliche Empfindung konstatiert wird. Zu anderen Schwellenwerten gelangt man, wenn nicht nur die Tatsache einer Empfindung angegeben, sondern die Qualität derselben erkannt werden soll, z. B. wenn nicht nur „Licht" aufgefaßt, sondern die Farbe desselben richtig bezeichnet wird. Solche Schwellenwerte werden spezifische Schwellen genannt und liegen allgemein höher, als die generellen Schwellen. Wenn auf unsere Sinnesorgane Reize einwirken, welche oberhalb der Schwellenwerte liegen, so erwächst die Aufgabe, anzugeben, in welcher Weise einem stärkeren Reiz eine stärkere Empfindung entspricht.

Ein absolutes Maß für die Intensität einer Empfindung haben wir nicht, wir können nicht sagen, eine bestimmte Empfindung sei zwei-, drei-, viermal so stark, als eine andere. Alle unsere Empfindungen sind relativ, d. h. wir können das Verhältnis zweier Empfindungen nur in der Weise angeben, daß wir die eine als stärker oder schwächer bezeichnen. Dabei läßt sich am schärfsten der Punkt ermitteln, an dem eine Empfindung E_1 eben merklich stärker oder schwächer, wie eine andere E_2 ist, und diesen Wert bezeichnen wir als die Unterschiedsschwelle. Mit ziemlicher Schärfe läßt sich auch angeben, ob von drei gegebenen Empfindungen E_1, E_2, E_3, die mittlere E_2 in ihrer Intensität sich mehr E_1 oder E_3 nähert, oder ob sie gleich verschieden von beiden ist, z. B. ob ein Ton E_2 um so viel stärker wie E_1 ist, wie er schwächer ist als E_3. Auf der Fähigkeit unserer Psyche, diese beiden Punkte scharf aufzufassen, gründen sich die ganzen psychophysischen Maßmethoden, auf die wir hier nicht näher eingehen können (vgl. die Artikel „Psychophysik" und „Psychologie").

Die Bestimmung der Unterschiedsschwellen hat im Gebiete verschiedener Sinne eine höchst bemerkenswerte Gesetzmäßigkeit ergeben, die unter dem Namen des Weber-Fechnerschen Gesetzes bekannt ist. Dieses Gesetz sagt aus, daß eine Empfindung eben merklich an Stärke zunimmt, wenn der Reiz um einen bestimmten Bruchteil verstärkt wird. Wir nennen das Verhältnis zweier Reize, die eben merklich voneinander verschieden sind, die relative Unterschieds-Schwelle, und das Webersche Gesetz sagt aus, das dies Verhältnis konstant ist, oder mit anderen Worten: wenn die Reizintensitäten wie eine geometrische Reihe wachsen, nehmen die Empfindungsintensitäten wie eine arithmetische Reihe zu. Fechner formulierte das Gesetz so, daß er sagte: die Intensität der Empfindung ist proportional dem Logarithmus der Reizintensität. Dieses Gesetz gehört zu den meist umstrittenen Punkten der Sinnesphysiologie. Betrachten

wir zunächst die tatsächlichen Grundlagen, so ergibt sich, daß das Webersche Gesetz nur innerhalb eines gewissen Intervalls gilt, daß es nur eine Näherungsformel ist. Am ausgedehntesten sind die Untersuchungen über die relativen Unterschiedsschwellen im Bereich des Gesichtssinnes. Bringt man auf einer weißen Scheibe in verschiedenen Abständen vom Mittelpunkt gleich breite Stückchen von schwarzem Papier an (Massonsche Scheibe) und versetzt die Scheibe in Rotation, so wird dem Weiß des Untergrundes Schwarz in verschiedener Menge zugemischt, um so weniger, je weiter die Streifen vom Mittelpunkte entfernt sind. Man kann nun diese Beimischung noch eben erkennen, wenn sie etwa $^1/_{120}$ beträgt, d. h. wenn die Intensität des rotierenden Streifens um diesen Wert von dem des weißen Grundes verschieden ist, und dieser Wert ist innerhalb ziemlich weiter Grenzen unabhängig von der absoluten Intensität des Lichtes, mit dem die Scheibe beleuchtet wird. Bei anderen Anordnungen findet man geringere Unterschiedsempfindlichkeiten, z. B. in den großen Untersuchungen von König nur $^1/_{57}$ im günstigsten Falle. Innerhalb einer Lichtintensität, die im willkürlichen Maß zwischen 500 und 100000 schwankte, wurden hier relative Unterschiedsschwellen von $^1/_{52}$ bis $^1/_{57}$ gefunden, d. h. innerhalb dieser Grenzen hat das Webersche Gesetz sehr nahe Gültigkeit. Bei geringeren Lichtintensitäten aber wie auch bei höheren ist die relative Unterschiedsschwelle größer, d. h. der Zuwachs des Reizes muß einen größeren Bruchteil betragen, damit ein Empfindungszuwachs bemerkt wird. So beträgt bei der Intensität 1 die Unterschiedsschwelle schon $^1/_8$, bei Intensität 10 ist sie $^1/_{21}$, bei 200 schon $^1/_{45}$ und bei einer Intensität von 1 Million beträgt sie wieder $^1/_{18}$. Diese sogenannten oberen und unteren Abweichungen vom Weberschen Gesetz sind also sehr bedeutende.

Für die anderen Sinne gilt ähnliches. So beträgt für das Ohr nur bei mittleren Schallintensitäten die relative Unterschiedsschwelle $^1/_3$, für Druckreize findet man zwischen 5 g und 20 g etwa $^1/_7$, zwischen 100 g und 1000 g etwa $^1/_{12}$. Für die Temperatursinne und chemischen Sinne ist die Konstanz der relativen Unterschiedsschwelle schwer erweisbar. Wächst die Intensität des Reizes über ein gewisses Maß hinaus, so erfährt die Empfindung keine weitere Steigerung mehr. Wir bezeichnen die Intensität, welche die maximale, nicht mehr weiter zu steigernde Empfindung auslöst, als die Reizhöhe.

Den objektiven Veränderungen der Intensität des Reizes vermögen unsere Empfindungen also nur innerhalb eines gewissen Intervalls zu folgen, das zwischen Reizschwelle und Reizhöhe eingeschlossen ist, und wir nennen das Verhältnis von Reizhöhe zu Reizschwelle den Reizumfang.

Was die theoretische Deutung der Beziehung von Reizintensität und Empfindung anlangt, so glaubte Fechner in der logarithmischen Beziehung einen Wert gefunden zu haben, der fundamental für das Verhältnis des Psychischen zum Physischen sei. Dieser Anschauung werden wir uns schon aus dem Grunde nicht anschließen können, weil die Geltung der logarithmischen Beziehung nur eine relativ beschränkte ist. Dem Physiologen liegt es heute viel näher, die Tatsachen, welche im Weber-Fechnerschen Gesetz zum Ausdruck kommen, ganz anders aufzufassen. Für eine ganze Reihe von Reizerscheinungen an lebenden Objekten, die mit Sinnesleistungen nichts zu tun haben, finden wir ganz dasselbe Gesetz der Konstanz der relativen Unterschiedsschwellen innerhalb eines mittleren Intervalls der Reizintensitäten und finden ebenso wie bei den Sinnesorganen die obere und untere Abweichung.

Wir werden danach annehmen können, daß die Art, wie unsere Empfindungen der steigenden Reizintensität folgen, durch physiologische Eigenschaften der peripheren Sinnesorgane bedingt ist, und diese Annahme scheint gestützt zu werden durch das Verhalten der objektiven Kriterien der Sinnestätigkeit, auf die wir unten noch eingehen müssen.

Es würde dann die Intensität der Empfindung ein genaues Bild der Intensität der Erregung der zentralen Ganglienzellen geben.

Wenn wir die Anschauungen der modernen Nervenphysiologie konsequent auf die Funktion der Sinnesorgane anwenden, so müssen wir aber noch einen Schritt weiter gehen. Die einzelne Nervenfaser arbeitet nach dem Gesetz des „Alles oder Nichts", d. h. eine Erregung, die überhaupt imstande ist, eine Nervenfaser in Tätigkeit zu versetzen, setzt sie sogleich in maximale Tätigkeit, so daß die Impulse, welche eine einzelne Ganglienzelle erhält, stets von gleicher Stärke sein und dementsprechend auch gleich intensive Reaktionen auslösen müssen, solange der Zustand ihrer Erregbarkeit keine Veränderungen erfährt.

Die Erregung einer einzigen Ganglienzelle würde dann die eben merkliche Empfindung, die Minimalempfindung auslösen, und die Zunahme der Intensität der Empfindung würde bedeuten, daß die Zahl der Ganglienzellen wächst, die in Erregung versetzt werden. Sobald alle Ganglienzellen eines bestimmten Sinneszentrums in Erregung versetzt sind, würden wir die Maximalempfindung haben. Wir würden dann weiter

anzunehmen haben, daß ein eben merklicher Zuwachs einer Empfindung stattfindet, sobald die Zahl der in Erregung befindlichen Ganglienzellen um einen gewissen Bruchteil wächst, da ja die einzelne Zelle stets eine maximale Empfindung vermittelt, d. h. die Form des Weberschen Gesetzes würde wieder durch Eigenschaften der zentralen Teile des Sinnesapparates bedingt sein. Es läßt sich zurzeit nicht übersehen, ob die Einführung dieser Anschauungen, die der allgemeinen Physiologie des Nervensystems entnommen sind, sich in der Physiologie der Sinne als fruchtbar erweisen werden.

Einige Worte verdienen die zeitlichen Eigenschaften der Empfindung. Die Dauer der Empfindung deckt sich nicht mit derjenigen des Reizes, denn die Empfindung tritt erst eine gewisse Zeit, nach dem der Reiz zu wirken begonnen hat, ein (Latenzzeit) und wenn er aufgehört hat, so dauert es wiederum eine gewisse Zeit, bis die Empfindung abgeklungen ist (Nachwirkung). Bei sehr kurzdauernden Reizen ist die Dauer der Empfindung nicht von der Dauer des Reizes, sondern von den physiologischen Eigenschaften der Sinnesorgane abhängig, z. B. beträgt die Dauer einer Lichtempfindung mindestens etwa $^1/_{12}$ Sekunde, auch wenn der Reiz, z. B. ein elektrischer Funke, ein Blitz nur Tausendstel einer Sekunde gedauert hat. In diesem Falle kann also die Dauer der Empfindung jene des Reizes um das 100-fache übertreffen.

Während Qualität, Intensität und Dauer Eigenschaften sind, die unbedingt jeder Empfindung zukommen, ist es fraglich, ob man dasselbe von zwei weiteren Eigenschaften behaupten kann, von dem Lokalzeichen und dem Gefühlston.

Sehr viele Empfindungen, besonders alle Gesichts-, Tast- und Schmerzempfindungen, werden im Raum lokalisiert, sie haben eine räumliche Eigenschaft, die man als ihr „Lokalzeichen" bezeichnet. Beim Gehör sind diese Lokalzeichen weniger bestimmt und ganz unbestimmt bei den chemischen Sinnen und den inneren Sinnen.

Umgekehrt ist die Gefühlsbetonung der Empfindungen bei den inneren und den chemischen Sinnen besonders ausgesprochen: Hunger und Durst sind stets mit negativen Gefühlstönen verbunden, sind unangenehm, und auch bei Geruchs- und Geschmacksempfindungen ist man kaum jemals geneigt, einen Sinneseindruck als indifferent, als weder angenehm noch unangenehm zu bezeichnen. Dagegen sind viele Empfindungen aus dem Gebiet der höheren Sinne, Gesicht und Gehör, kaum mit einem deutlichen Gefühlston behaftet. Bei genügender Intensität freilich wird jede Empfindung gefühlsbetont und zwar stets negativ, selbst dann, wenn dieselbe Qualität bei geringerer Intensität positiv betont war. So ist z. B. das Süße für die meisten Menschen bei nicht zu hoher Intensität angenehm, für alle aber bei großer Intensität unangenehm.

11. Objektive Kriterien der Sinnestätigkeit. Wenn auch die Empfindungen das wesentlichste Material liefern, mit dessen Hilfe die Physiologie der Sinne aufgebaut worden ist und dauernd ausgebaut wird, so muß doch besonders daran erinnert werden, daß die materiellen Vorgänge, welche in den peripheren Sinnesorganen, den Sinnesnerven und Sinneszentren ablaufen, prinzipiell ebensogut einer Untersuchung mit Hilfe physikalischer oder chemischer Methoden unterworfen werden könnten, wie die Lebenserscheinungen irgendeines anderen Gewebes, z. B. der Muskeln oder Drüsen. Ueber Methoden von solcher Feinheit, daß sie die subjektiven Angaben der Versuchspersonen über ihre Empfindungen ersetzen könnten, verfügen wir zurzeit nicht, wohl aber können wir auch jetzt schon einige objektive Kriterien angeben, die uns gestatten, das Funktionieren von Sinnesorganen auch da festzustellen, wo wir über die auftretenden Empfindungen keine Nachricht erhalten.

Völlig im Stich läßt uns die mikroskopische Methodik, denn die Untersuchung eines Sinnesorgans zeigt uns nicht, ob es in dem Augenblick, in dem es zur mikroskopischen Untersuchung fixiert wurde, sich im ganzen oder in einzelnen Teilen in Ruhe oder in Erregung befand. Was die histologische Technik zeigt, bezieht sich nur auf einige ganz grobe Unterschiede, z. B. ist bei einzelnen Sinnesorganen der Zustand der Ermüdung oder Ueberreizung mikroskopisch zu erkennen.

Es liegt in der Natur der Sache, daß das Mikroskop, das uns sehr genau den Zustand in einem gegebenen Zeitpunkt erkennen läßt, kein Instrument ist, mit dem wir die rasch, zum Teil in Bruchteilen von Sekunden, ablaufenden Prozesse in den Sinneszellen verfolgen können und dasselbe gilt von den chemischen Methoden, die bisher angewandt sind, um Unterschiede der ruhenden und tätigen Sinnesorgane zu ermitteln.

Ganz anders liegen die Dinge, sobald man zur Untersuchung der Prozesse in den Sinnesorganen, Sinnesnerven und eventuell Sinneszentren sich der elektrischen Ströme bedient, die bei jeder stofflichen Aenderung in der lebendigen Substanz auftreten.

Wir nennen diese Ströme Aktionsströme und haben — besonders im Saitengalvanometer — ein äußerst empfindliches Instrument, das auch sehr rascher Aenderungen der Stromintensität zu folgen und so ein getreues Bild der bioelektrischen Vorgänge

zu entwerfen vermag (vgl. den Artikel „Elektrizitätsproduktion“).

Da erst seit wenigen Jahren genügend feine Instrumente für derartige Untersuchungen existieren, so sind erst wenige Resultate gewonnen worden und diese beziehen sich größtenteils auf die Aktionsströme der Netzhaut des Auges. Werden an die Innen- und Außenseite einer isolierten Netzhaut Elektroden angelegt, so ist ein Strom gewisser Intensität zu beobachten (Ruhestrom). Trifft nun ein Lichtreiz das Auge, so zeigt der Strom sehr charakteristische Schwankungen, deren Typus unter günstigen Versuchsbedingungen in allen Klassen der Wirbeltiere derselbe ist.

Die Wirkung besteht zunächst in einer negativen Schwankung des Stromes, die rasch auf die Belichtung folgt (negative Vorschwankung) und bald in eine kräftige positive Schwankung (positive Eintrittsschwankung) übergeht. Während der Belichtung bleibt der Strom stärker, als er im Dunkeln war (Dauerwirkung). Nach der Verdunkelung erfolgt eine positive Schwankung (Verdunkelungsschwankung), worauf der Strom langsam zur ursprünglichen Stärke absinkt. Eine genauere Analyse dieser verwickelten Stromschwankungen hat gezeigt, daß es sich dabei um drei Vorgänge handelt, von denen der eine im Sinnesepithel abläuft, der zweite auf die Ganglienzellenschichten der Netzhaut zu beziehen ist. Diese beiden Vorgänge scheinen nach ihrem ganzen Verhalten unmittelbar mit dem Sehen in Beziehung zu stehen, während der dritte Vorgang (III in Fig. 1), der sehr viel langsamer verläuft, nicht unmittelbar im Dienste der Empfindungsauslösung zu stehen scheint und wohl auf Prozesse der Umstimmung des Sehorgans (Dunkel- oder Helladaptation) zu beziehen ist (Piper). Figur 1 zeigt den Gesamtverlauf und seine Zusammensetzung aus den drei genannten Einzelvorgängen.

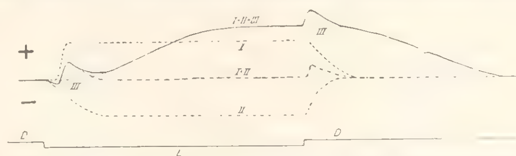


Fig. 1. Analyse der Netzhautströme. L Licht, D Dunkel. I, II und III: Die drei Teilvorgänge, aus deren Ueberlagerung sich die Form der gesamten Stromschwankung erklärt. Nach Piper.

Von Sinnesnerven aus sind gelegentlich Aktionsströme abgeleitet worden. Besondere Erwähnung verdienen die Untersuchungen am Hörnerven von Fischen, bei denen Aktionsströme beobachtet wurden, wenn das innere Ohr durch Töne gereizt wurde (Piper).

Ein theoretisch bemerkenswertes Resultat haben die Untersuchungen über die Beziehung der Größe des elektromotorischen Effektes zu der Intensität des angewandten Reizes im Bereich des Lichtsinnes ergeben, indem sie zeigten, daß innerhalb eines weiten Intervalls die Aktionsströme proportional den Logarithmen der Reizintensitäten sind, d. h. sich so verhalten, wie das Weber-Fechnersche Gesetz es erfordert. Aber auch hier hat sich — genau wie bei der Prüfung seiner Gültigkeit mit Hilfe der Empfindungen — für schwache Reize eine sehr bedeutende „untere Abweichung“ ergeben. Bis in das Gebiet der oberen Abweichung sind die Reizintensitäten nicht gesteigert worden.

Die Möglichkeit, ohne Angaben der Versuchsperson Aufschluß über die Arbeit der Sinnesorgane zu gewinnen, ist mit den genannten Methoden nicht erschöpft, wir haben vielmehr noch physiologische Kriterien, die eine Untersuchung von Sinnesleistungen auch da gestatten, wo das untersuchte Lebewesen entweder nichts über seine Empfindungen angeben will oder kann (Neugeborene, Tiere). Gerade für sinnesphysiologische Untersuchungen an Tieren ist diese Möglichkeit von größter methodologischer Bedeutung.

Die Impulse, welche auf dem Wege der Sinnesorgane und Sinnesnerven den nervösen Zentren zufließen, haben ganz allgemein eine Wirkung auf die Bewegungsapparate der Tiere: sie lösen entweder Bewegungen aus oder hemmen sie. Im ersteren — einfacheren — Falle haben wir also in dem Eintritt einer Bewegung ein Zeichen dafür, daß ein Sinnesorgan in Tätigkeit getreten ist. Die Bewegungen können Reflexe sein oder in das Gebiet der Handlungen gehören. Die Schwierigkeit in der Verwendung von Bewegungen als Anzeichen der Sinnestätigkeit liegt darin, daß ein Sinneseindruck erst eine gewisse übermerkliche Intensität erreicht haben muß, um Reflexe auszulösen und besonders darin, daß die Reflextätigkeit, die von einem Sinnesorgan ausgelöst werden würde, durch andere Impulse von anderen Sinnesorganen oder höheren Zentren her gehemmt werden kann, so daß äußerlich der Erfolg unsichtbar bleibt. Eine besondere Form der Untersuchung von Sinnesleistungen bei Tieren stellt die sogenannte Dressur-

methode dar. Hierbei wird ein Tier dressiert, stets auf einen bestimmten Sinneseindruck (Ton, Farbe usw.) eine Bewegung auszuführen, gewöhnlich nach einem Bissen zu schnappen, und man kann nun prüfen, wie groß der Unterschied eines zweiten Reizes gegenüber dem Dressurreiz sein muß, um als verschieden aufgefaßt zu werden.

12. Die Sinnesorgane und ihre Hilfsapparate. In den bisherigen Ausführungen war vom Bau der Sinnesorgane gar nicht die Rede. Die Erfahrungen über ihre Leistungen konnten gemacht werden ohne nähere Kenntnis der anatomischen Verhältnisse. Den Sinnesorganen kommen aber eine ganze Reihe anatomischer Merkmale zu, die zu ihren Leistungen in erkennbarer Beziehung stehen, und deren Kenntnis besonders bei vergleichenden Betrachtungen über die Verbreitung und Leistung von Sinnesorganen wertvoll ist.

Von größtem Werte für eine vergleichende Physiologie der Sinnesorgane wäre es, wenn wir imstande wären an den Sinneszellen der verschiedenen uns in ihrer Funktion bekannten menschlichen Sinnesorgane bauliche Eigentümlichkeiten festzustellen, die in unmittelbarer Beziehung zu den physikalischen oder chemischen Eigenschaften des adäquaten Reizes stünden; aber solche Eigenschaften sind uns nicht bekannt. Wohl wissen wir genau, wie eine Lichtsinnzelle beim Menschen aussieht (Stäbchenzellen, Zapfenzellen), kennen genau den Bau der Zellen, die im inneren Ohr der Schallrezeption dienen, sind mit dem Bau der Riechzellen und der Geschmackszellen bekannt, aber wir können zwischen den Merkmalen, die die genannten Zellen von anderen Zellen unseres Körpers unterscheiden, und den Reizen, die adäquat für sie sind, keinerlei Beziehung feststellen, vor allem keine solche, die notwendig erschiene und sich infolgedessen überall da wiederfinden müßte, wo gleiche Sinne entwickelt sind.

Die tiefgehenden funktionellen Verschiedenheiten, z. B. die zwischen Stäbchenzellen und Zapfenzellen der Netzhaut des Auges bestehen, hätten wir nicht nur niemals aus dem Bau dieser Gebilde ableiten können, sondern auch, nachdem wir die funktionellen Unterschiede kennen, können wir sie nicht mit den anatomischen Unterschieden in direkten Zusammenhang bringen. Bei den Tastsinnen, dem Schmerzsinn und den Temperatursinnen vollends, bei denen wir nicht einmal für den Menschen mit Sicherheit angeben können, wie die Endorgane gebaut sind, ist eine mikroskopische Erkennung entsprechender Endorgane bei anderen Lebewesen ganz ausgeschlossen.

In diesem verzweifelten Zustande kommt uns ein Umstand zu Hilfe: die meisten Sinnesorgane bestehen nicht nur aus den Sinneszellen, die der Rezeption des ädaquaten Reizes dienen, sondern haben außerdem eine ganze Reihe von Hilfsapparaten, die in ihrer Eigenart auf die Beschaffenheit des Reizes hinweisen, dessen Rezeption das Sinnesorgan dient.

Die Hilfsapparate können wir einteilen in solche, die

1. dem adäquaten Reiz den Zutritt zu den Sinneszellen ermöglichen oder erleichtern;
2. die Intensität des adäquaten Reizes steigern;
3. eine Lokalisation des adäquaten Reizes bewirken.

In vielen Fällen können wir nun aus dem Bau der Hilfsapparate einen Rückschluß auf den adäquaten Reiz machen und so Sinnesorgane erkennen. Dieser Methode sind aber in mancher Richtung Grenzen gesteckt. Wie wollen wir z. B. Organe eines Schmerzsinnes bei anderen Organismen feststellen? Wir kennen keine Hilfsapparate des Schmerzsinnes beim Menschen und wenn es Tiere gäbe, die etwa bei starker Berührung besonders mit spitzen Gegenständen Schmerzempfindungen hätten, so würden wir höchstens Apparate finden können, die zur Rezeption mechanischer Reize geeignet wären, denen wir aber niemals ansehen könnten, ob sie dem Tastsinn oder dem Schmerzsinn dienen. Dasselbe gilt für alle typisch „inneren" Sinne, bei denen wir schon beim Menschen nicht die adäquaten Reize kennen und deshalb Sinnesorgane für dieselben bei anderen Tieren selbst dann nicht erkennen würden, wenn sie durch besondere Hilfsapparate ausgezeichnet wären, was beim Menschen nicht der Fall und wohl für Tiere auch unwahrscheinlich ist. Es liegen hier große Gebiete der vergleichenden Physiologie vor, zu deren Bearbeitung wir zurzeit noch nicht einmal eine methodische Möglichkeit sehen.

13. Vergleichende Sinnesphysiologie. Die Einteilung der Sinne nach den Empfindungen, die uns für den Menschen die vollkommenste erschien, läßt sich auf die Gesamtheit der Organismen nicht anwenden, wir müssen hier vielmehr die Einteilung auf die adäquaten Reize basieren. Eine solche Einteilung würde etwa folgende Form haben:

Sinnesorgane für

I. strahlende Energie	1. Lichtsinne
II. mechanische Energie	
a) Tastsinne	2. Drucksinne
	3. Tastsinne s. str.
	4. Stoßsinne

b) Sinne für die Erdschwere	5. Statische Sinne
c) Sinne für Töne	6. Gehörsinne
III. thermische Energie	7. Temperatursinne
IV. chemische Energie	8. Geruchssinne
	9. Geschmackssinne.

Da dem Menschen Sinnesorgane für elektrische Energie fehlen, so ist diese Energieform in das Schema nicht aufgenommen, doch wäre es nicht unmöglich, daß Organe hierfür bei irgendwelchen Tieren bestünden, und es würde auch keine methodische Unmöglichkeit sein, zu erkennen, daß elektrische Reize bestimmter Form die adäquaten Reize für solche Organe wären. Positives ist hierüber nicht bekannt, und als wahrscheinlich kann die Existenz derartiger Sinne nicht bezeichnet werden.

13a) Der Lichtsinn. Organe des Lichtsinnes, die als Augen, oder, wenn sie primitiver gebaut sind, als Ocellen bezeichnet werden, sind im Tierreich ungemein weit verbreitet, während es für Pflanzen noch durchaus zweifelhaft ist, ob bestimmte Bildungen auf einigen Laubblättern, welche sich senkrecht gegen das einfallende Licht einzustellen vermögen, wirklich als Organe der Lichtrezeption, d. h. als Ocellen bei Pflanzen aufzufassen sind.

Bei einer Reihe von Tieren konnte man keine besonderen Organe der Lichtrezeption finden, obgleich sie in hohem Maße lichtreizbar sind, z. B. der Regenwurm, eine Reihe von Muscheln, eine Anzahl Seeigel, und man sprach infolgedessen von einem „Lichtsinn augenloser Tiere". In fast allen diesen Fällen hat die feinere mikroskopische Untersuchung bereits gezeigt, daß diese Tiere doch besondere Sinneszellen haben, daß sie nicht etwa „mit der ganzen Haut sehen", wie man sich wohl vorstellte, wenn man von einer „dermatoptischen Funktion" sprach. Es sind die genannten Lichtsinnorgane die einfachsten, welche wir überhaupt kennen, denn sie bestehen zum Teil nur aus den Sinneszellen und ermangeln jeglicher Hilfsapparate, an denen wir sonst Lichtsinnorgane zu erkennen vermögen.

Tiere, denen wirklich Lichtsinnorgane fehlen, trifft man in allen größeren Klassen des Tierreichs an. Besonders ist die größte Anzahl der Tiere, die im Dunkeln leben, blind, z. B. das Heer der Parasiten, die in anderen Tieren leben, viele Höhlentiere und eine ganze Anzahl von Tieren aus der Tiefsee. Daß diesen Tieren Augen nichts nützen würden, liegt auf der Hand. Merkwürdiger ist die Tatsache, daß eine ganze Reihe von Ameisen blind oder fast blind sind und ebenso alle „Arbeiter" und „Soldaten" der sogenannten weißen Ameisen, der Termiten, die den Heuschrecken und Schaben (Orthopteren) nahe verwandt, nur äußerlich den Ameisen ähnlich sind. Alle diese Tiere vollbringen komplizierte Leistungen: legen weite Wege zurück, marschieren in geschlossenen Kolonnen usw., ohne daß Augen sie dabei leiten.

Die Augen sind ja die bevorzugten Organe zur Regulierung von Bewegungen: Tiere, die keine Bewegungen ausführen, z. B. festsitzende Tiere, haben keine oder zurückgebildete Augen. Wo besonders lebhafte und präzise Bewegungen ausgeführt werden, fehlen Augen niemals, z. B. gibt es kein blindes Flugtier, diese höchste Form der Bewegung steht stets unter der Kontrolle von Augen. Allerdings sind die Augen der Fledermäuse nur schwach entwickelt und ihre Funktion wird sehr wesentlich durch das Gehör unterstützt.

Die Anwendung objektiver Methoden hat es ermöglicht, einige funktionelle Eigentümlichkeiten der Augen von Tieren zu ermitteln, die für den Vergleich mit den Leistungen des menschlichen Auges wichtig sind.

Zunächst ist es die Frage, ob alle Tiere das Spektrum in derselben Ausdehnung sehen, wie wir. Für Tiere, die entweder stets den hellsten oder den dunkelsten Teil des Raumes aufsuchen, in dem sie sind, kann man ermitteln, ob Strahlen von größerer oder geringerer Wellenlänge wie diejenigen, welche wir sehen können, noch einen Reizwert haben. Dabei stellte sich heraus, daß für einen Kleinkrebs (Daphnia) und für die Ameisen das ultraviolette Licht, das wir nicht sehen, noch Lichtreaktionen auslöste. Es hat sich aber gezeigt, daß es sich hierbei nicht um eine wirkliche Verlängerung des physiologisch wirksamen Teils des Spektrums handelte, sondern um eine physikalisch bedingte Erscheinung. Es fluoreszieren nämlich die lichtbrechenden Teile der Augen von Krebsen und Insekten stark im Ultraviolett und die Tiere sehen dieses, auch unserem Auge sichtbare, Fluoreszenzlicht.

Andererseits ergaben Untersuchungen an Schildkröten und einigen Tagvögeln, daß eine beträchtliche Einschränkung der Sichtbarkeit des Spektrums am ~~roten~~ Ende bestand, doch auch dieser Unterschied erwies sich als rein physikalisch bedingt durch die gefärbten Oeltropfen, die in den Sehzellen der genannten Tiere liegen, und die das Licht passieren muß, bevor es die lichtreizbaren Teile der Zellen trifft. Blicken wir durch ein Glas von der Farbe dieser Oeltropfen, so sehen wir das Spektrum ebenso verkürzt.

Auch die weitere interessante Frage, welchen Reizwert die einzelnen Spektralfarben für die verschiedenen Tiere haben, ist experimentell zu beantworten, sobald man

Tiere zur Untersuchung wählt, die phototaktische Bewegungen ausführen, d. h. entweder dem helleren oder dunkleren Teil des Raums sich zu bewegen, oder die auf eine Lichtmehrung oder Lichtminderung mit Bewegungen des ganzen Körpers oder bestimmter Teile (Iris, Augenmuskeln, Chromatophoren) reagieren. Derartige Untersuchungen haben nun bei allen Wirbellosen, die untersucht wurden, nämlich bei einer Anzahl Muscheln, bei Tintenfischen, Krebsen und Insekten, sowie bei dem Amphioxus zu dem Resultat geführt, daß der Reizwert der einzelnen Teile des Spektrums für sie **ein ganz anderer ist, wie für das helladaptierte menschliche Auge, dagegen sehr nahe übereinstimmt mit der Verteilung der Reizwerte des dunkeladaptierten Auges oder, was dasselbe ist, mit der Verteilung der Reizwerte für das total farbenblinde Auge** (Heß). Das Maximum der Helligkeit liegt für alle diese Tiere im Gelbgrün, von da aus nimmt die Wirkung nach dem roten Ende des Spektrums sehr rasch, nach dem violetten Ende langsamer ab. Die roten Lichter haben für alle diese Tiere ganz ungemein geringe Reizwerte. Diese Verteilung der Reizwerte ist unabhängig von der Intensität der Beleuchtung. Für die Fische ist die Frage noch nicht endgültig entschieden, ob auch sie sich wie der total farbenblinde Mensch verhalten, d. h. ob sie nur Helligkeitsunterschiede und keine Farbenunterschiede aufzufassen vermögen (Heß) oder ob ihnen — **wenigstens einzelnen Formen — die Fähigkeit der Farbenrezeption zukommt (Bauer, v. Frisch).**

Für die höheren Wirbeltiere, Amphibien, Säugetiere, Reptilien und Vögel dagegen hat sich eine volle Uebereinstimmung der Art ihres Farbensehens mit demjenigen des Menschen ergeben. Es kommt dies am deutlichsten darin zum Ausdruck, daß bei ihnen das sogenannte Purkinje-Phänomen nachweisbar ist. Man bezeichnet hiermit **die Erscheinung, daß die relative Helligkeit** der Farben bei Hell- und Dunkeladaptation des Auges eine verschiedene ist, und zwar in der Weise, daß die roten Lichter, die bei Helladaptation einen hohen Reizwert haben, bei Dunkeladaptation sehr schwach wirksam sind, während die blauen Lichter relativ stark wirksam bleiben. Ein rotes und blaues Feld, die bei starker Beleuchtung gleich **hell erscheinen, oder von denen sogar das rote heller erscheint, ändern bei Herabsetzung der Beleuchtung ihre relative Helligkeit so, daß das rote dunkler erscheint, ja schließlich völlig wirkungslos ist, d. h. schwarz erscheint, während das blaue noch hell in einem sehr wenig gesättigten Blau gesehen wird.** Die Fähigkeit des menschlichen Auges in seiner Erregbarkeit den Schwankungen der Beleuchtung zu folgen, d. h. die Fähigkeit der Dunkeladaptation, hat sich auch für Tiere nachweisen lassen (Heß). Im Dunkeln steigt die Erregbarkeit ganz außerordentlich. Beim Menschen erreicht sie in etwa einer halben Stunde das 4000- bis 7000-fache des Wertes bei Helladaptation und ähnliche Zahlen gelten für Tiere, z. B. nimmt die Erregbarkeit beim Amphioxus auf das 4000-fache zu, bei einem Tintenfisch auf das 1200-fache, bei dem kleinen Krebs der Salinen (Artemia salina) auf das ca. 1800-fache und auch bei der Bohrmuschel (Pholas) konnte eine Steigerung auf das 600-fache nachgewiesen werden.

Eine für die Art unseres Sehens äußerst charakteristische Fähigkeit ist die, mit Hilfe des Kontrastes uns scharfe Konturen zu schaffen, überhaupt die Fähigkeit Licht- und Farbeneindrücke anders aufzufassen, wenn sie isoliert einwirken, als wenn sie gleichzeitig mit anderen Licht- und Farbeneindrücken aufgefaßt werden. Es kommt in dieser Fähigkeit eine gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Sehelemente zum Ausdruck und auch diese ist nicht nur für den Menschen eigentümlich, sondern auch bei niederen Tieren nachweisbar. Für Krebse (Idotea, Mysis) ließ sich erweisen, daß in dem vom Licht nicht getroffenen Teil des Auges ein Prozeß vor sich geht, welcher dem im gereizten Teil ablaufenden entgegengesetzt ist, d. h. daß hier Vorgänge ablaufen, die wir beim Menschen als Simultankontrast **bezeichnen würden.**

Die Frage, ob die Tiere auch eine Tiefenwahrnehmung besitzen, hat man in der Weise zu beantworten gesucht, daß man z. B. eine Maus von einer Platte, die in verschiedener Höhe über einem Tisch angebracht war, herunterspringen ließ und da sich in der Zeit, die das Tier vergehen ließ, bis es den Sprung wagte, deutliche Beziehungen zur Höhe des Sprunges zu erkennen gaben, hat man auf die Fähigkeit der Tiefenwahrnehmung geschlossen.

Es bestehen nach diesen Erfahrungen weitgehende Uebereinstimmungen zwischen den Leistungen der Lichtsinnorgane des Menschen und der Tiere in bezug auf die Adaptationsfähigkeit, die Fähigkeit des Kontrastes, die der Tiefenwahrnehmung und in bezug auf die physiologische Begrenzung des sichtbaren Spektrums.

Dagegen müssen wir alle niederen Tiere, wahrscheinlich mit Einschluß der Fische, als total farbenblind ansehen und eine Vorstellung von der Art, wie die für uns und die höheren Wirbeltiere bestehenden Qualitätsunterschiede der Farben für diese Tiere als Intensitätsunterschiede erscheinen, können wir gewinnen, wenn wir mit dunkeladaptiertem Auge beobachten.

Wenn wir nach den oben gegebenen Gesichtspunkten die Hilfsapparate der Lichtsinnorgane betrachten, so finden wir als Einrichtungen, die dem Lichtreiz den Zutritt zu den Sinneszellen ermöglichen oder erleichtern, die besondere Ausbildung der Gewebe, die zwischen den Sinneszellen und der Körperbedeckung liegen. Alle diese Elemente sind durchsichtig und in dieser physikalischen Eigenschaft liegt ihre physiologische Funktion. Dabei ist nicht stets eine gleichmäßige Durchlässigkeit für alle Farben erreicht, sondern bei vielen Tieren kommen Färbungen der lichtdurchlässigen Gewebe vor, die wie Lichtfilter die Zusammensetzung des ,,terminalen" Lichtes, d. h. des Lichtes, das wirklich die Sehelemente trifft, nicht unbedeutend verändern können. Daß z. B. durch die gefärbten Oeltropfen, die bei Reptilien und Vögeln vom Licht passiert werden müssen, bevor dies die Sehzellen erregt, eine Verkürzung des Spektrums im roten Teil zustande kommt, wurde schon erwähnt. Beim Menschen (und anderen Säugetieren) kann die kristallklare Linse sich im Alter gelb bis braun färben, ohne daß eine Trübung eintritt, wodurch es in extremen Fällen direkt zu einer Violettblindheit kommen kann.

Unter den Einrichtungen, welche der Reizverstärkung oder Reizschwächung dienen, haben wir solche zu unterscheiden, die in besonderen baulichen Eigentümlichkeiten der Augen bestehen, und solche, die rein funktionell sind. Zu den letzteren könnte man die Adaptationsfähigkeit rechnen, die schon erwähnt wurde. Hierhin gehört auch der Sehpurpur, ein Farbstoff, der in den Sehelementen der Wirbeltiere (hauptsächlich den Stäbchen) sowie der Tintenfische und einiger Würmer vorkommt und als optischer Sensibilisator dient. Seine Wirkung steht in naher Beziehung zur Adaptationsfähigkeit der Sehelemente.

Von strukturellen Einrichtungen zur Verstärkung des Lichtreizes sind die Gewebe und Apparate zu nennen, welche das Licht konzentrieren, im vollkommensten Falle ein Bild der Außenwelt entwerfen, das je nach der Art der Einrichtungen, sehr verschieden hell und sehr verschieden scharf sein kann. Die Helligkeit der Bilder in den Augen hängt von rein physikalischen Faktoren ab, nämlich von der Winkelgröße der ,,Blende", durch die das Licht zu den Sinneszellen tritt und von dem Verhältnis der Brechungskoeffizienten der Augenmedien (Bildraum) zu jenem des Objektraumes. Von der absoluten Größe der Sehorgane ist die Helligkeit nicht abhängig, so daß große und kleine Augen dieselbe Helligkeit haben können. Dagegen bestehen deutliche Beziehungen der Bildhelligkeit zu der Intensität der Beleuchtung, bei der die Tiere normalerweise sehen. Setzen wir die Helligkeit der Bilder im menschlichen Auge bei diffusem Tageslicht als Einheit, so beträgt die Helligkeit beim Pferd das 3-fache, bei einem Tiefseefisch (Odontostomus) das 5,1-fache und beim Hamster das 5,3-fache.

Die Helligkeit des Bildes im einzelnen Auge kann je nach der Intensität der Beleuchtung variieren, indem die Weite der Blende sich ändert. Bei Insekten und Krebsen wird dies dadurch erreicht, das dunkles Pigment, das bei schwacher Beleuchtung geballt in der Tiefe der Augen liegt, bei starkem Licht die lichtbrechenden Gewebe mehr oder weniger einhüllt und so die Blenden verengt, durch die das Licht eintritt. Bei den Wirbeltieren bewirkt die Zusammenziehung oder Erschlaffung der Muskeln in der Regenbogenhaut (Iris) sehr rasch eine Veränderung der Blendenweite, die der jeweiligen Beleuchtung entspricht.

Die Schärfe der Bilder in den Sehorganen hängt von der optischen Vollkommenheit der lichtbrechenden Medien ab. Bei den Wirbeltieren, Tintenfischen und einigen einzelstehenden Formen der Muscheln, Krebse und Insekten werden die Bilder durch Linsen entworfen, ähnlich wie in unseren photographischen Apparaten. Ein Unterschied der tierischen Linsen gegenüber den Glaslinsen der Technik liegt anscheinend allgemein darin, daß die letzteren aus homogenem Material hergestellt sind, das einen bestimmten Brechungskoeffizienten hat, während bei den tierischen Linsen das Brechungsvermögen von den äußeren Schichten bis zum Kern hin zunimmt. Bei einer derartig gebauten Linse ist die gesamte brechende Kraft noch größer, als sie es sein würde, wenn die ganze Linse aus dem Material des Kerns hergestellt wäre, das den höchsten Brechungsindex hat.

Das Blickfeld eines Linsenauges ist im allgemeinen ein großes, es erreicht häufig fast 180° und nur die allerengwinkeligsten Linsenaugen haben Blickfelder von 6 bis 8°. Schon solche von 20 bis 40° sind selten. Demgegenüber sind die Einzelaugen (Einzelommen), aus denen sich die zusammengesetzten Augen der Krebse und Insekten aufbauen, ganz außerordentlich engwinkelig. Die Bilder in ihnen werden nicht durch Linsen entworfen, sondern durch sogenannte Linsenzylinder, Gebilden, die in ihren distalen Teilen zylindrisch gestaltet, in den proximalen meist kegelförmig zugespitzt sind und bei denen der Brechungsindex vom Zylindermantel aus gegen die Achse zunimmt. Diese Linsenzylinder können unmittelbar an ihren Enden bereits Bilder entwerfen, was bei Linsen nicht möglich ist. Dadurch daß derartig engwinkelige Einzelaugen in großer

Zahl zusammentreten, erhält das „Komplexauge" wieder ein weites Blickfeld, so daß funktionell dasselbe erreicht wird, wie bei den Linsenaugen.

Ein Linsenauge kann, selbst wenn es ohne optische Fehler gebaut ist, Gegenstände nur dann scharf abbilden, wenn sie in einer bestimmten Entfernung vom Auge gelegen sind. Aendert sich die Entfernung des Gegenstandes, so muß, wenn das Bild scharf bleiben soll, eine Veränderung an dem bildentwerfenden Apparat des Auges erfolgen. Wir nennen solche Aenderungen, die die scharfe Einstellung verschieden entfernter Objekte bewirken, akkommodative Veränderungen. Die Fähigkeit der Akkommodation ist bei Wirbeltieren und Tintenfischen weit verbreitet. Der Mechanismus der Einstellung ist in den verschiedenen Klassen sehr verschieden und beruht teils auf einer Krümmungsänderung der Linsen, teils auf Verschiebungen derselben. Es kommt sowohl Annäherung der Linse an die Fläche der Sehelemente (bei Fischen) wie Entfernung von ihr (bei Tintenfischen und Amphibien) vor, je nachdem wie die Einstellung des Auges in der Akkommodationsruhe ist. Das Auge der Fische, das auf einen nahen Punkt eingestellt, also kurzsichtig ist, akkommodiert für die Ferne, die übrigen Augen, die in der Ruhe auf unendliche Entfernung eingestellt sind, müssen dagegen akkommodieren, wenn nahe Objekte eingestellt werden sollen. Die größten Anforderungen werden bei jenen Tieren an die Akkommodation gestellt, die sowohl in Luft wie in Wasser gut zu sehen vermögen, z. B. die Teichschildkröte, die Ringelnatter, der Kormoran. In diesen Fällen reicht die Akkommodation aus, um die Unterschiede im Gange der Lichtstrahlen auszugleichen, die dadurch gegeben sind, daß die brechende Kraft der Hornhaut im Wasser fortfällt. Der Umfang der Akkommodation kann in solchen Fällen 17 Dioptrien (Ringelnatter), ja 40 bis 50 Dioptrien (Kormoran) erreichen, während im allgemeinen eine Akkommodationsbreite von 8 bis 10 Dioptrien schon als eine gute Fähigkeit zu betrachten ist.

Mit den Ausführungen über die Schärfe der Bilder, die Ausdehnung der Blickfelder und die Akkommodationsapparate haben wir schon die dritte Gruppe von Hilfseinrichtungen der Sehorgane erwähnt, die der Lokalisation und der räumlichen Anordnung der Lichtreize dienen, und von ausschlaggebender Bedeutung für die Sehschärfe der Augen sind.

Als absolutes Maß für die Sehschärfe können wir die „auflösende Kraft" der Augen benutzen, d. h. die Fähigkeit, zwei Punkte getrennt aufzufassen. Dieses Trennungsvermögen ist um so größer, je größer einerseits die Bilder der Gegenstände in den Augen sind und je größer andererseits die Zahl der Endorgane die in isolierter Verbindung mit den Ganglienzellen der Sehzentren stehen, auf einem Flächenteil des Sehepithels ist.

Die Größe der Bilder hängt von der absoluten Größe der Augen ab. Man kann sich die Verhältnisse recht deutlich machen, wenn man berechnet, um wieviel kleiner in den verschiedenen Augen das Bild einer Kreisscheibe von 1 cm Durchmesser ist, die in 1 m Entfernung vor dem Auge steht (d. h. unter einem Winkel von 34,5′ erscheint), als diese Scheibe selbst.

Die lineare Verkleinerung beträgt in diesem Falle in den kleinen Augen des Käfers Acilius das 4360-fache, bei der Springspinne (Salticus) das 1432-fache, beim Frosch das 202-fache, beim Menschen das 62-fache, beim Strauß das 31- und beim Finwal das 25-fache.

Wenn die Bilder in zwei Sehorganen gleich groß und gleich scharf sind, so können sie trotzdem verschiedene Sehschärfe haben, denn für diese ist weiter maßgebend, wieviele „Innervationskreise" auf der Flächeneinheit nebeneinander liegen. Die Bedingung dafür, daß zwei Punkte getrennt gesehen werden, ist die, daß zwischen zwei in Erregung befindlichen Endelementen oder Innervationskreisen ein unerregtes Element liegt.

Im vollkommensten Falle ist jedes Sehelement einzeln mit den Gehirnteilen des Auges verbunden, so daß seine Erregung gesondert von der jedes anderen Elementes zu den Zentren geleitet wird. In diesem Falle ist der Innervationskreis ebenso groß wie der Raum, den ein Sehelement im Verbande der Lichtsinnzellen einnimmt. Welche Unterschiede in dieser Hinsicht vorkommen, mögen einige Zahlen zeigen. Es entfallen auf 1 mm² des Sehepithels an Sinneszellen bei

Spelerpes (Amphibium)	2 500
Sepia (Tintenfisch)	20 000
Alciope (mariner Wurm)	48 000
Edelfalke	69 000
Sperling	444 000
Ratte	1 400 000

Ob in diesen Fällen stets auf jede Sinneszelle eine Ganglienzelle entfällt, d. h. ob sie alle isoliert zu den nervösen Zentren abgeleitet werden, ist nicht bekannt, in anderen Fällen aber wissen wir, daß viele Sinneszellen zu einer Ganglienzelle abgeleitet werden, z. B. im extremen Falle bei einem Zahnwal (Hyperoodon) mehr als 7000.

Unter Berücksichtigung aller dieser Eigenschaften der verschiedenen Augen kann man eine Grenze für ihre auflösende Kraft berechnen. Setzt man die Sehschärfe des Menschen, wie sie für den Bezirk des schärf-

sten Sehens (gelben Fleck) bestimmt ist, gleich 10000, so beträgt das Auflösungsvermögen beim Sperber 14600, beim Pferde 11100, dagegen bei der Elefantenrobbe nur 1000, beim Finwal 400 und wenn wir noch einige Insekten zum Vergleich heranziehen, so beträgt der Wert für den Gelbrandkäfer (Dytiscus) 182, für die Stubenfliege nur 82. Es ist dabei aber zu bedenken, daß die Entfernungen, auf die die verschiedenen Tiere unter normalen Verhältnissen zu sehen haben, sehr verschieden sind und daß die kleinen Tiere, besonders die Insekten, insofern günstiger gestellt sind, als sie auf ganz kurze Entfernungen noch sehen können, auf die kein Linsenauge mehr brauchbare Bilder liefert. So würde z. B. eine Fliege auf 1 cm Entfernung Gegenstände bei etwa demselben Abstande als getrennt aufzufassen vermögen, bei dem für den Menschen in 1 m Entfernung die Leistungsgrenze des Auges erreicht wäre.

13b) Die Tastsinne. Ueber die Tastsinne der Tiere liegen vergleichend-physiologische Erfahrungen kaum vor. Unser Wissen beschränkt sich hier fast ganz auf die Kenntnis der Hilfsapparate und nur die Pflanzenphysiologie lehrt uns, daß wir im Bereich der Tastsinne drei verschiedene Sinne werden unterscheiden müssen. Zunächst den Drucksinn, für den das bewegungslose Anpressen den ädaquaten Reiz darstellt, ferner den Tastsinn im engeren Sinne des Wortes, für den die Reibung, welche bei der Bewegung zweier fester Körper aneinander auftritt, als ädaquater Reiz wirkt, und endlich den Stoßsinn, bei dem Erschütterungen rezipiert werden. Das klassische Beispiel für die Tastreizbarkeit sind die Ranken der Kletterpflanzen, die für geringe Reibung an einem festen Körper ganz ungemein empfindlich sind, dagegen durch Zerrungen durch den Wind, durch Aufschlagen von Wassertropfen oder sogar eines Quecksilberstrahls, sowie durch Berührung mit einem feuchten Gelatinestab nicht erregt werden. Die Stoßreizbarkeit ist dagegen bei den Mimosen, die auf den Reiz ihre Blätter senken, beim Sauerklee (Oxalis) und bei einigen Staubfäden (Centaurea. Berberis) hoch entwickelt, bei Objekten, die nur geringe Tastreizbarkeit besitzen.

Die Hilfsapparate der Tastsinne sind im Tier- und Pflanzenreich nach einem sehr einheitlichen Prinzip gebaut, und lassen in ihrer Gestaltung keine Unterschiede erkennen, die in Beziehung zu den drei genannten Formen der Tastreizbarkeit gebracht werden könnten. Stets handelt es sich bei den Hilfsapparaten um Einrichtungen. die darauf abzielen, daß am Ort der Reizrezeption eine möglichst starke und streng lokalisierte Deformation der reizbaren Gebilde erzielt wird, so daß ein steiles Druckgefälle entsteht.

Im einfachsten Falle wird dies dadurch erreicht, daß die Gewebe, welche über der reizbaren Substanz liegen, verdünnt werden, wobei die dünnste Stelle häufig auf einer kleinen Papille (Tastpapille) liegt, um dem Reiz noch leichter zugänglich zu sein. Geht die Ausbildung der Hilfsapparate weiter, so haben wir die ganze Mannigfaltigkeit der Tasthaare oder Tastborsten, bei denen der Reiz, an einem langen Hebelarm wirkend, eine viel stärkere Deformation der reizbaren Gebilde bewirken kann, als wenn er direkt die reizbare Stelle träfe.

13c) Der Schweresinn. Alle Organismen sind beständig den Wirkungen der Schwerkraft ausgesetzt, die gegen den Schwerpunkt der Erde, d. h. senkrecht auf die Fläche einer ruhenden Flüssigkeit wirkt. Der Druck, den die Organismen infolge der Beschleunigung der Schwere auf ihre Unterlage ausüben, ist abhängig von ihrem spezifischen Gewicht, und da dies für die einzelnen Bestandteile eines Organismus verschieden ist, drücken die spezifisch schwereren Teile auf die spezifisch leichteren und zwar um so stärker, je größer die Differenz des spezifischen Gewichtes zwischen den verschiedenen Geweben ist.

In der Wachstumsrichtung der Pflanzen und festgewachsenenen Tiere wie in der Bewegungsrichtung und Körperhaltung der frei beweglichen Tiere zeigen sich viele Beziehungen zur Richtung der Schwerkraft, und es entsteht die Frage, ob eine etwaige Wirkung, die die Schwerkraft dabei ausübt, sich auf alle Teile der Tiere und Pflanzen gleichmäßig erstreckt, oder ob es Zellen gibt, die mit einer besonderen Sensibilität für die Beschleunigung der Schwere ausgestattet sind. In diesem Falle dürfen wir von einem „Sinn“ für die Schwerkraft, oder wie man gewöhnlich sagt, von einem statischen Sinne sprechen.

Organe, welche durch den Bau ihrer Hilfaspparate als geeignet für eine Rezeption der Schwere erscheinen, sind bei vielen Tieren seit langem bekannt und in einer ganzen Reihe von Fällen hat das Experiment ergeben, daß nach ihrer Entfernung die Tiere nicht mehr imstande sind ihre typische Körperhaltung zu wahren und ganz charakteristische Bewegungsstörungen zeigen. Solche Erfolge der Entfernung eines statischen Sinnesorgans sind bei den Kammquallen (Ctenophoren), bei Tintenfischen, vielen Krebsen und bei den Wirbeltieren beobachtet.

Die wesentliche Hilfseinrichtung für ein Organ der Schwererezeption ist der Statolith, d. h. der spezifisch schwere, meist aus Kalk bestehende Körper, der auf

die reizbaren Gebilde drückt. Seine Entfernung oder die Durchschneidung des Nerven, der zu dem Sinnesorgan geht, hat die erwähnten Bewegungsstörungen zur Folge. Bei bilateral symmetrisch gebauten Tieren sind die Organe des statischen Sinnes paarig angeordnet und die Zerstörung des einen führt zu Uhrzeiger-, Manege- oder Rollbewegungen.

Im Pflanzenreich hat man die beweglichen Stärkekörner, die in vielen Organen gefunden werden, welche durch Schwerkraftwirkungen erregt werden, als analog mit den Statolithen angesehen, doch ist der Beweis für die Richtigkeit dieser Anschauung nicht mit derselben Schärfe wie für die Tiere erbracht.

13d) Der Gehörsinn. Viel weniger weit verbreitet, als die Organe des Lichtsinns, der Tastsinne und des statischen Sinnes sind Gehörorgane im Tierreich.

Man kann im allgemeinen sagen, daß nur solche Tiere hören können, die selber Töne produzieren und diese Fähigkeit ist auf die Stämme der Gliederfüßler (Arthropoden) und Wirbeltiere beschränkt.

Wohl gibt es auch außerhalb dieser Stämme Tiere, welche auf Töne reagieren z. B. einige marine Würmer, aber von spezifischen Gehörorganen kann bei ihnen nicht gesprochen werden. Für einige Krebse ist erwiesen, daß sie auf Schallreize reagieren und zwar mit Hilfe von Sinneshaaren, die in naher räumlicher Beziehung zu den Organen des statischen Sinnes stehen, so daß sich die Frage, ob diese Tiere hören, ob sie Gehörorgane haben, darauf zuspitzt, ob die Schallreize adäquate Reize für die Sinneshaare sind, deren Erregung beobachtet wurde. Während hier Organe bekannt sind, die man als Gehörorgane ansprechen könnte, fehlt uns bei einer Reihe von Insekten z. B. bei den Bienen jede anatomische Kenntnis solcher Organe, obgleich die biologische Beobachtung zu dem sicheren Schluß führt, daß die Bienen hören und eine Anzahl verschiedener Töne unterscheiden können.

Innerhalb des Stammes der Wirbeltiere besteht nur für die Fische eine Kontroverse darüber, ob sie hören können. Daß sie auf Töne reagieren ist sicher, doch wurde angenommen, daß diese Reaktionen mit Hilfe von Hautsinnesorganen zustande kämen und daher nicht als der Ausdruck der Hörfähigkeit betrachtet werden dürften. Da sich aber ergeben hat, daß die Reaktionen ausbleiben, wenn die „Gehörnerven" (achten Gehirnnerven) durchschnitten sind, dagegen meist richtig eintreten, wenn nur die Hautnerven durchtrennt sind, so wird man den Fischen doch die Fähigkeit mit Hilfe des inneren Ohres auf Schall zu reagieren nicht absprechen können, zumal da auch objektiv die Erregung des achten Hirnnerven durch Schall nachgewiesen worden ist (s. o.). Eine besondere Schwierigkeit bietet die Frage nach dem Gehör der Tiere deshalb, weil nicht auf alle Gehörsreize eine prompte Reaktionsbewegung erfolgt. Beim Frosch z. B. veranlassen Töne allein nie eine motorische Reaktion, wirken aber gleichzeitig mechanische oder optische Reize ein, so steigern die Schallreize den Erfolg der anderen Reizarten, und hierdurch allein kann man die Wirksamkeit der Schallreize sichtbar machen. Es ergab sich, daß eine solche Steigerung des Erfolges mechanischer oder optischer Reize eintritt, wenn die verwendeten Töne zwischen 50 und 10000 Schwingungen pro Sekunde hatten, d. h. daß die Hörgrenzen des Frosches ein Intervall von mehr als 4 Oktaven umfassen.

13e) Temperatursinne. Ueber die Verbreitung und Leistung von Temperatursinnesorganen bei Tieren wissen wir nichts, obgleich biologische Beobachtungen in vielen Fällen es nahe legen, ihr Vorhandensein anzunehmen.

13f) Die chemischen Sinne. Auch über die vergleichende Physiologie der Geruchs- und Geschmackssinne läßt sich etwas Allgemeines nicht sagen, es ist hier nur vor der Uebertragung menschlicher Begriffe von Geruch und Geschmack dringend zu warnen. Systematische Versuche, die adäquaten Reize der chemischen Sinne bei Tieren festzulegen und zu gruppieren, fehlen vollständig, nur einige wenige gelegentliche Beobachtungen liegen vor.

Literatur. **J. Müller**, *Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtsinnes usw. Leipzig 1826.* — **v. Helmholtz,** *Die Tatsachen in der Wahrnehmung. Berlin 1870.* — **Strümpell,** *Ein Fall von allgemeiner Anästhesie. Deutsches Archiv für klinische Medizin, Bd.* **22**, *1878.* — **S. Exner,** *Die Physiologie des facettierten Auges von Krebsen und Insekten. Leipzig und Wien 1891.* — **v. Frey,** *Beiträge zur Physiologie des Schmerzsinnes. Ber. d. Sächs. Akad., math.-physik. Kl. Leipzig 1894.* — **Zwaardemaker,** *Physiologie des Geruchs. Leipzig 1895.* **v. Helmholtz,** *Handbuch der physiologischen Optik, 2. Aufl. Hamburg und Leipzig 1896.* — **H. Oehrwall,** *Ueber die Modalitäts- und Qualitätsbegriffe in der Sinnesphysiologie. Skandinav. Arch. f. Physiol., Bd.* **11**, *1901.* — **J. v. Kries,** *Zur Psychologie der Sinne. Nagels Handbuch der Physiologie, Bd.* **3**, *1904.* — **W. Nagel,** *Die Lehre von den spezifischen Sinnesenergien. Nagels Handbuch der Physiologie, Bd.* **3**, *1904.* — **Piper,** *Untersuchungen über das elektromotorische Verhalten der Netzhaut bei Warmblütern. Arch. f. Anat. u. Physiol., Phys. Abt., Supplement, 1905.* — **Haberlandt,** *Physiologische Pflanzenanatomie, 4. Aufl. Leipzig 1909.* — **A. Pütter,** *Vergleichende Physiologie. Jena 1911.* — **v. Hess,** *Gesichtssinn, im Hand-*

buch der Vergleichenden Physiol., Bd. 4, 1912. — **A. Pütter**, *Organologie des Auges, 2. Aufl. Leipzig 1912.*

A. Pütter.

Sinter

sind Mineralüberzüge auf Gesteinen und anderen Gegenständen.

Sipunculidea.

1. Uebersicht der Organisation. 2. Besondere Ausbildung einzelner Organe. 3. Systematik. 4. Ontogenie und Regeneration.

Die Sipunculideen sind bodenbewohnende Meereswürmer, die in einiger Hinsicht an die Echiurideen (vgl. Bd. II, S. 1204) erinnern, aber in anderen Punkten sich so weit davon entfernen, daß ihre früher übliche Vereinigung mit diesen als Gephyrea ziemlich allgemein aufgegeben ist.



Fig. 1. Sipunculus norvegicus. a After, g Eichel, s Mündung eines Nephridiums. ca. 2 : 3. Nach Théel 1905.

1. Uebersicht der Organisation.

Ihr Körper ist in einen walzenförmigen Rumpf und einen oft erheblich engeren einstülpbaren „Rüssel" (Introvert) geschieden (Fig. 1). Am Vorderende des letzteren befindet sich der Mund, während die Afteröffnung nicht wie bei den Echiurideen endständig ist, sondern auf der dorsalen Seite nahe dem Vorderende des Rumpfes angebracht ist.

Die für die Echiurideen charakteristischen Borsten fehlen stets: daher die Bezeichnung als Gephyrea inermia oder achaeta. Dagegen ist wie bei jenen der Rumpf ein ziemlich dünnwandiger Sack, dessen Innenraum von einer einheitlichen, mit einer zellenreichen Flüssigkeit erfüllten Leibeshöhle (Cölom) eingenommen ist. Die Körperwand besteht aus einer Epidermis, die von einer im Vergleich mit den Echiurideen recht starken Cuticula bekleidet ist, einem darunter gelegenen, bisweilen ungemein schwachen, nur selten mächtigeren Corium und einem sich an dieses anschließenden Hautmuskelschlauch. Dieser ist wie bei den Echiurideen aus 3 Schichten, nämlich wie dort aus einer Ring- einer Längs- und einer Diagonalfaserlage, zusammengesetzt; aber die Diagonalfasern sind hier nicht nach innen von den Längsfasern, sondern zwischen diesen und den äußeren Ringfasern gelegen, obwohl sie sich hinsichtlich ihres Verlaufes, insbesondere was die Ueberschreitung der dorsalen und ventralen Mittellinie anbetrifft, in beiden Gruppen wieder wesentlich gleich verhalten. Die Auskleidung der Leibeshöhle besorgt ein oft, stellenweise wohl sogar immer wimperndes Peritonealepithel.

Alle diese Schichten setzen sich ununterbrochen in den Rüssel fort, wo in der Regel nur der Hautmuskelschlauch weniger dick und die Haut oft mit cuticularen Haken besetzt ist, die mehr oder weniger regelmäßig in Ringen angeordnet sein können und gegen den Rumpf zu allmählich verschwinden (Fig. 10, a und b).

Leibeshöhle. Die Leibeshöhle wird in erster Linie von dem Darm eingenommen, der vom Munde durch den Rüssel bis gegen das Hinterende des Rumpfes verläuft, von dort aber sich wieder nach vorn zum After wendet, so daß er eine Schleife bildet (s. Fig. 2). Diese ist immer schraubenförmig um eine meist von einem Spindelmuskel eingenommene Achse aufgewunden (Darmspira, dsp). Ferner liegen darin, der ventralen Seite des Hautmuskelschlauches meist auch im Bereiche des Rüssels dicht angelagert, das wie bei den Echiurideen zylindrische, höchstens ein wenig abgeflachte, keine abgegrenzten Ganglien aufweisende Bauchmark (n), im vorderen Teile des Rumpfes, etwa auf der Höhe des Afters ausmündend, ein Paar Nephridien (ne) und endlich eine sehr wenig umfangreiche Gonade (go). Blutgefäße sind nicht vorhanden. Dagegen schließen sich an den Darmkanal als charakteristische und wichtige Gebilde Retraktormuskeln (retr.) an, welche die erwähnte Einstülpung des Rüssels in den Rumpf bewirken, typisch 2 Paare, und ein dünnwandiges, kanalartig ausgebildetes System von Hohlräumen, das den vorderen Abschnitt des Darmkanales begleitet, selten (Sipunculus) je ein Kanal dorsal und ventral demselben entlangziehend, meist nur einer auf der dorsalen Seite. Es hat sich herausgestellt, daß diese Kanäle nach der Natur ihres zelligen Inhalts ein von der übrigen Leibeshöhle abgeschlossenes zweites Cölom darstellen und passend als Cölomgefäße

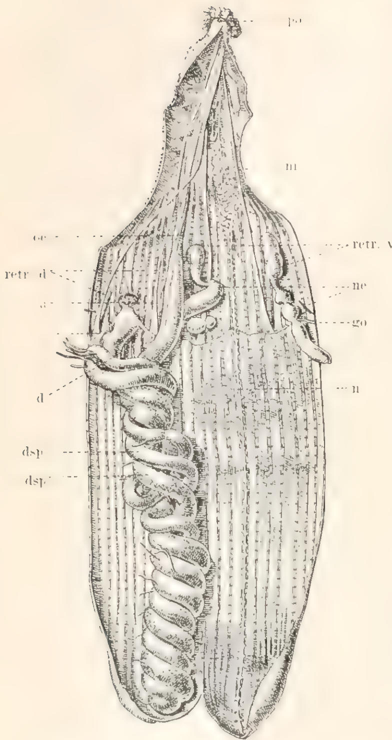


Fig. 2. Sipunculus norvegicus. Nahe der dorsalen Mittellinie aufgeschnitten. a After; d Enddarm-Divertikel; dsp Darmspira absteigend, dsp' aufsteigend; go Gonade; n Bauchmark, nr dasselbe im Rüssel; ne Nephridien; oe Oesophagus; po Porus des Cerebraltubus; retr. Retraktoren, d dorsale, v ventrale. Nach Théel 1905.

bezeichnet werden. Am Vorderende des Darmkanals pflegt es sich zu erweitern, umgreift bisweilen diesen ringförmig und geht über in die Hohlräume von Tentakeln oder tentakelähnlichen Fortsätzen, welche die Mundöffnung umstellen oder in deren Nähe angebracht sind.

Nervensystem. Das Nervensystem (Fig. 3) unterscheidet sich von dem der Echiurideen darin, daß das Bauchmark (n) sich an seinem Vorderende nicht in zwei von Zellen begleitete schließlich bogenförmig ineinander übergehende Schenkel teilt, sondern zwei zellenfreie Kommissuren (com) abgehen läßt, die sich mit dem dorsal vom Schlunde dem Cölomgefäß dicht angelagerten bilateral symmetrisch gestalteten Gehirn (cer) verbinden. Zu diesem begeben sich Nerven von den am Kopfe angebrachten Sinnesorganen, zu den Schlundkommissuren solche von den Tentakeln (te), während von dem Bauchmark mehr oder weniger regelmäßig paarig Nerven ausgehen, deren Fasern teils von den Sinnesorganen der Hautkörper (siehe unten) kommen, teils zur Muskulatur führen dürften.

Darmspira. Die Darmspira ist einerseits durch Muskelstränge mit dem Spindelmuskel, andererseits durch einige oder zahlreiche (Sipunculus) „Befestiger" mit der Rumpfwand verbunden. Der Darmkanal gliedert sich nach

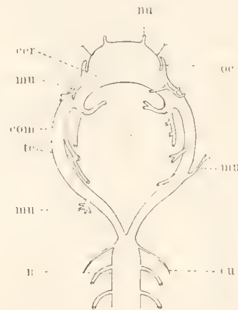


Fig. 3. Bauchmark (n), Schlundkommissuren (com) und Gehirn (cer) von Phascolosoma vulgare mit davon ausgehenden Nerven zum Integument (cu), zur Muskulatur (mn) und zu den Tentakeln (te). oc Blindsack, an dessen Grunde der Ocellus liegt. Nach Cuénot.

dem Bau seiner Wand in mehrere meistens äußerlich kaum voneinander abgesetzte Teile, einen Oesophagus, einen die Spira bildenden Mitteldarm, der vielfach, wenn nicht überall, durch eine in seiner ganzen Länge ausgebildete Wimperrinne gekennzeichnet ist, und einen letzten Abschnitt, in dem man bisweilen wieder zwei Abschnitte unterscheiden kann, einen kürzeren oder längeren Hinterdarm (Rectum), dessen Wandung reich an Drüsenzellen ist, und einen immer kurzen, der letzteren entbehrenden End- oder Afterdarm. Nahe dem Ende des Mitteldarmes tritt oft ein Blindsack (Fig. 2, d) von unbekannter Funktion auf, ähnlich dem, der sich auch bei vielen Echiurideen findet. Dagegen sind die für die letzteren charakteristischen mit Wimpertrichtern besetzten Analschläuche nie vorhanden. „Büschelförmige Anhänge", die (sogenannten Analdrüsen), die vereinzelt (bei einigen Sipunculus-Arten) kurz vor dem Uebergang in den Afterdarm auftreten, haben damit nichts zu tun,

sondern sind Aussackungen eines, wie es scheint, der Gattung Sipunculus eigentümlichen Systems von Hohlräumen (des sogenannten Sinus), das in der ganzen Ausdehnung des Mitteldarmes zwischen dem Darmepithel und dem Peritonealbezuge desselben auftritt. Sie sind sowohl gegen das Darmlumen wie gegen das Cölom abgeschlossen, und über ihre Funktion ist nichts bekannt.

Nephridien. Die Nephridien sind von denen der Echiurideen immer dadurch unterschieden, daß 1. nie mehr als ein Paar vorhanden ist, 2. die Zellen des sie auskleidenden Epithels mit braunen oder gelblichen Exkretkörnchen beladen sind (daher die Bezeichnung dieser Organe als „braune Körper") und 3. ihr Nephrostom niemals trichterförmig ist, sondern ausschließlich von einer bogenförmigen, rechts und links sich dem Peritoneum anlegenden dorsalen Lippe (li) gebildet, unter der ein sich allmählich verengender Kanal in den größeren sack- bis schlauchförmigen Teil des Organs führt (Fig. 4). Injiziertes Indigkarmin wird in sie ausgeschieden.

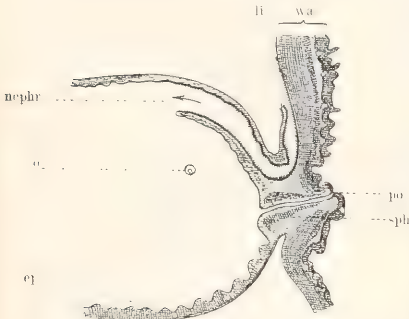


Fig. 4. Sagittalschnitt eines Nephridiums von Phascolosoma vulgare. ep sezernierendes Epithel des Sackes; li dorsale Lippe des Nephrostoms; nephr. der in dem Sack einmündende Nephrostomalkanal; o Ei; po Porus des Nephridiums; sph Sphinkter; wa Rumpfwand. 25:1. Nach Cuénot.

Geschlechtszellen. Die Geschlechtszellen finden sich, soweit sie beobachtet sind, meist zu einer kleinen Krause angeordnet, die quer über den Ursprung der ventralen Retraktoren hinzieht (Fig. 2, go), gelegentlich in deren Nähe, an der Leibeswand. Hiervon lösen sie sich auf früher Ausbildungsstufe ab, fallen in die Leibeshöhle und werden mit den Cölomocyten in deren flüssigem Inhalt umhergetrieben, bis sie ihre Ausbildung zu Eizellen oder Spermien beendigt haben. Erst dann werden sie in den sackförmigen Teil der Nephridien aufgenommen und durch den Porus dieser entleert. Die Nephridien sind also zugleich Gonoducte. Meistens besteht Geschlechtertrennung; doch kommt gelegentlich (Phascolosoma minutum) Zwittrigkeit vor, indem ein Teil der Geschlechtszellen der Gonade zu Eizellen, ein anderer zu Samenzellen sich entwickelt.

2. Besondere Ausbildung einzelner Organe. — Haut. Wie bei den Echiurideen ist die Epidermis an vielen Stellen zu „Hautkörpern" differenziert. Diese sind teils Sinnesorgane, teils Drüsen, in sehr vielen Fällen aber zusammengesetzte Bildungen, in denen Drüsenzellen in wechselnder Zahl ein oder mehrere Sinnesorgane umschließen. An bestimmten Körperzellen, so im Rüssel, am hinteren Teile des Rumpfes, der bisweilen als eine sogenannte „Eichel" mehr oder weniger abgesetzt erscheint, sind sie vielfach in besonderer Weise ausgebildet. Das kann auch von der Cuticula gelten, die namentlich in der Gattung Aspidosiphon und bei ihr nahestehenden Formen zu charakteristischen Scheiben und Schildern am Hinterende des Rumpfes oder auch an seinem Vorderende, in der Umgebung des Afters, ausgebildet ist (Fig. 5), bei Cloeosiphon mit eingelagerten Kalkplättchen an letzterer



Fig. 5. Aspidosiphon mirabilis. a Uebergang des Rumpfes in den Rüssel mit dem vor dem After gelegenen Analschild, b Hinterende des Rumpfes mit dem Schwanzschild. 6:1. Nach Théel.

Stelle. Einer Cuticula entbehren nur die Tentakel, die stets an ihrer der Mundöffnung zugekehrten Seite mit Wimperepithel bekleidet sind. Eigentümliche, sehr große und ziemlich weit gegen das Cölom vorspringende Hautdrüsen mit engem, meistens etwas gewundenem Ausführungsgang sind die sogenannten Kefersteinschen Bläschen in der Gattung Siphonosoma usw.

Tentakel. Die Ausbildung der Tentakel bei den verschiedenen Gattungen ist bis jetzt nur in Bruchstücken bekannt, hauptsächlich durch die Untersuchungen von Théel (1905) an Phascolosoma-Arten der arktischen

Meere. Danach kann man wohl immer von einer rechten und einer linken, durch eine dorsale und eine ventrale mundwärts einspringende Bucht voneinander getrennten halbkreisförmigen Falten ausgehen, deren jede etwa in der Mitte zunächst durch eine Ausbuchtung in eine dorsale und eine ventrale Hälfte geteilt wird; in jeder von diesen entstehen hierauf weitere der primären ähnliche Ausbuchtungen, zuerst sekundäre, dann zwischen diesen und der primären bezw. den beiden medianen Einbuchtungen tertiäre usw., wobei die Ränder dieser Ausbuchtungen eventuell mit mehr oder minder zahlreichen fingerförmigen Fortsätzen, den sogenannten Tentakeln, besetzt werden, die daher als Ganzes kranzförmig angeordnet erscheinen (Fig. 6). Ebenso sind die in geringerer Zahl bei Phascolion vorhandenen Tentakel angeordnet, von denen aber über die Folge ihrer Bildung noch nichts bekannt ist, so daß eine Vergleichung mit denen von Phascolosoma im einzelnen einstweilen nicht möglich ist. Bei Dendrostoma bilden Gruppen solcher Tentakel eine verschiedene Anzahl ziemlich scharf voneinander abgesetzter Aeste. Bei Sipunculus-Arten ist nur eine kreisförmige Membran vorhanden, deren Rand mit wechselnd tiefen Einschnitten versehen ist (Fig. 7). Bei Physcosoma bilden sich Tentakel nur um die dorsale Einbuchtung herum, in der das Nuchalorgan (siehe unten) gelegen ist, während die seitlichen und ventralen Teile der primären Falte schwach und ohne Tentakel bleiben (Tentakelmembran). Etwas dahinter umgibt den Rüssel noch eine kreisförmige Falte, der sogenannte Kragen (Fig. 8). Ob der Zustand bei gewissen sehr kleinen Phascolosoma-Arten, Onchnesoma usw., wo statt der Tentakel nur auf jeder Seite ein niedriger Wulst vorhanden ist, primitiv ist oder als auf Rückbildung beruhend angesehen werden muß, ist einstweilen nicht zu entscheiden, wenn auch letzteres wahrscheinlicher ist.

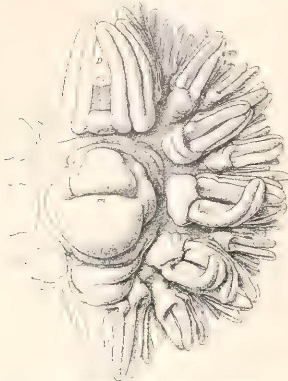


Fig. 6. Tentakelkranz von Phascolosoma margaritaceum. Vom Munde m ausgesehen. cs Nuchalorgan; D dorsal; V ventral. ca. 12 : 1. Nach Théel 1905.



Fig. 7. Gelappte Tentakelmembran von Sipunculus norvegicus. Vom Munde m aus gesehen. ca. 9 : 1. Nach Théel 1905.

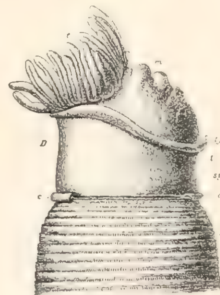


Fig. 8. Seitenansicht des vorderen Rüsselendes von Physcosoma lovenii. c „Kragen“, teilweise weggeschnitten; D dorsal; h Hakenringe; m Mund; t die das Nuchalorgan umstellenden Tentakel, die auf der „Tentakelfalte“, tf, nicht ausgebildet sind; V ventral. ca. 12 : 1. Nach Théel 1905.

Muskulatur. Die Längsmuskelschicht ist bei Sipunculus, Siphonosoma, Dolichosiphon, Physcosoma, einigen Aspidosiphon-Arten und bei einer einzelnen Phascolosoma-Art (Ph. gouldi) im Bereiche des Rumpfes in eine erhebliche Anzahl von Bündeln gesondert, bei Sipunculus (Fig. 2) und Dolichosiphon auch die Ringmuskellage und wohl bei allen die übrigens oft sehr schwach ausgebildete oder gar fehlende Diagonalmuskellage. Im Rüssel verschmelzen die Längsmuskelbündel mehr oder weniger vollständig, ebenso bisweilen in der „Eichel".

Integumentalräume. Mit der Sonderung der Muskulatur in Bündel ist bisweilen ein eigentümliches Verhalten des Cöloms verbunden, indem es zwischen den Bündeln der Längsmuskulatur und dort, wo auch Ringmuskelbündel vorhanden sind, zwischen diesen, bei der Gattung Siphonosoma aber durch die geschlossene Ringmuskelschicht hindurch, durch sogenannte Stomata, blind geschlossene Fortsätze bis in das Corium hinein und oft bis dicht unter die Epidermis entsendet. Bei Siphonosoma und Dolichosiphon entfalten sich die aus einer Stomalreihe hintereinander entspringenden Blindsäcke zunächst innerhalb der Ringmuskulatur transversal und entsenden dann in das Corium longitudinal nach vorn und hinten gerichtete, oft verästelte Cöca, wodurch Systeme von mannigfaltiger Gestalt entstehen. Bei Sipunculus entfalten dagegen die aus einer Stomalreihe entspringenden Blindsäcke sich nach außen von der Ringmuskelschicht longitudinal nach vorn und hinten, und dann entstehen bei vielen Arten durch Verschmelzen aufeinander treffender Blindsäcke über die ganze Länge des Rumpfes fortlaufende Längskanäle (Integumentalkanäle). Dazu können noch blindsackförmige Ausstülpungen kommen, die in der Nähe der Stomata abgehen und sich zwischen Längs- und Diagonalmuskulatur erstrecken (Intermuskularcöca). Bei Sipunculus und Dolichosiphon sind diese Cölomaussackungen auf den Rumpf beschränkt, während sie sich bei Siphonosoma auch im Rüssel finden, aber entsprechend dem Verhalten der Muskulatur nicht in so regelmäßiger Anordnung in Längs- und Querreihen wie im Rumpf.

Darmkanal. Die Spira wird bei den meisten Arten der Gattung Sipunculus dadurch komplizierter, daß ein vorderer Teil des Mitteldarmes noch für sich eine besondere Schleife bildet, die ebenfalls schraubenförmig um den Spindelmuskel gewunden ist, so daß im vorderen Teile der Spira nicht nur 2, sondern 4 Darmteile umeinander geschlungen sind.

Bei Siphonosoma, das einen besonderen Hinterdarm (Rectum) aufweist, ist dessen an Drüsenzellen sehr reiches Epithel dick und erscheint in Längsfalten gelegt; bei gewissen Arten entfaltet sich deren Grund zu mächtigen zottenartig über die Oberfläche des Rectums in die Leibeshöhle vorspringende Drüsen (S. vastum usw.).

Bei Phascolosoma-Arten und wahrscheinlich auch in einigen anderen Gattungen gehen vom rückläufigen Teil des Mitteldarmes kleine, fingerhutförmige, von Wimperepithel ausgekleidete Blindsäckchen in großer Zahl aus.

Der Spindelmuskel pflegt vor dem After in der dorsalen Mittellinie zu entspringen, um zunächst dem End- und Hinterdarm bezw. dem Endabschnitt des Mitteldarmes

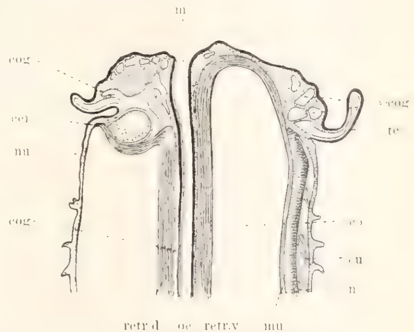


Fig. 9. Sagittalabschnitt durch das Vorderende des Rüssels von Phascolosoma vulgare mit ganz ausgestrecktem Tentakelkranz. cer Gehirn; cö Cölom; cög Cölomgefäß; cu Nerven vom Bauchmark (n) zur Haut; m Mund; mu Muskulatur der Bauchmarkscheide; nu mediane Rinne des Nuchalorgans; oe Oesophagus; retr Retraktoren, d dorsale, v ventrale; te Tentakel. Nach Cuénot.

zu folgen und dann in die Spira einzutreten, in der er entweder endigt oder aus der er hinten wieder hervortritt, um sich an das Hinterende des Rumpfes anzusetzen.

Nervensystem und Sinnesorgane. Das Gehirn (Fig. 9) liegt immer der Epidermis unmittelbar an, indem es diese mit seinem Vorderende berührt. Bei den meisten Gattungen liegt dieses Berührungsgebiet bei ausgestrecktem Rüssel in dem allgemeinen Hautniveau oder stellt eine seichte Grube dar, die bei Rückziehung des Rüssels bisweilen erheblich tiefer wird; bei Sipunculus befindet es sich immer am Grunde eines mehr oder weniger tiefen, engen Sackes, des sogenannten Cerebraltubus.

Das Bauchmark ist auf dem Querschnitt entweder kreisrund oder quer oval. Oft aber erscheint diese letztere Gestalt erheblich gesteigert, so daß das Bauchmark fast bandförmig wird. Dies ist nicht die Folge einer Verbreiterung seiner nervösen Bestandteile, sondern des Verhaltens der Hülle: in eine bindegewebige Scheide sind Längsmuskelfasern eingebettet, die zu beiden Seiten besonders stark ausgebildet sind und die Verbreiterung hervorrufen. Sie erstrecken sich an dem ganzen Bauchmark entlang und sind besonders kräftig im Bereiche des Rüssels. Ein abweichendes Verhalten zeigt nur Sipunculus, wo die bindegewebige Hülle eine äußerst komplizierte Ausbildung aufweist (vgl. H. v. Mack 1902), der Längsmuskelfasern aber ganz entbehrt. Dagegen spaltet sich etwa auf der Grenze von Rüssel und Rumpf von den beiden dem Bauchmark benachbarten Längsmuskelbündeln des Hautmuskelschlauches je ein Faserstrang ab, der sich diesem seitlich anlegt und, stets außerhalb der Hülle bleibend, ihm bis an sein Vorderende folgt. Dabei entfernt sich in dieser Gattung der Rüsselabschnitt des Bauchmarks nach vorn zu fortschreitend von der Haut, während sich entsprechend die Nerven, die von ihm zu dieser abgehen, mehr und mehr verlängern.

Sinnesorgane kommen in verschiedener Ausbildung vor. Weit verbreitet ist ein Paar Augen, die stets im Innern des Gehirns gelegen sind. Es sind everse Retinae, meist mit schwarzem Pigment ausgestattet, aber auch bisweilen desselben entbehrend, am Grunde je eines engen, gewöhnlich etwas gewundenen Kanals (Fig. 3 oc), der von der an das Gehirn angrenzenden Epidermis ausgeht. Weiter steht bei vielen Sipunculideen mit dem Gehirn durch kürzere oder längere Nerven ein oft durch eine Längsfurche in zwei Hälften geteiltes Sinnesorgan in Verbindung, das der unmittelbar hinter dem Berührungsepithel folgenden Epidermis angehört, welche hier oft eine polsterartige Coriumverdickung überzieht und immer Wimperhaare trägt (Wimperpolster, von Cuénot vermutungsweise dem Nuchalorgan der Polychäten verglichen; Fig. 11). Demselben hat man, übrigens wohl kaum mit Recht, das sogenannte Cerebralorgan des Sipunculus gleichgesetzt, eine polsterartige nicht von Wimpern bekleidete Verdickung des Grundes des Cerebraltubus, die dem Berührungsepithel entspricht, dessen Zellen auch bei allen anderen Sipunculideen sensorische Funktionen haben dürften, da von ihnen immer Nervenfasern zum Gehirn treten. Zu den Sinnesorganen des Kopfes gehören endlich vielleicht auch flache Wimperepithelscheiben mit einer zentralen Grube, die auf dem vordersten Rüsselabschnitt und an der Außenseite der Tentakel in großen Mengen bei Sipunculus vorhanden sind. Außerdem aber finden sich am Rüssel und Rumpfe zahlreiche Sinnesorgane, die im allgemeinen die Gestalt sogenannter Sinnesknospen aufweisen, unter den Hautkörpern, indem diese entweder reine Sinnesknospen oder Vereinigungen solcher mit Drüsen sind. Schließlich kommt bei Siphonosoma und Physcosoma ein Sinnesorgan in Gestalt einer Epithelblase vor, die dem Vorderende des Bauchmarkes, zwischen die daraus entspringenden Schlundkommissuren eingekeilt, dicht anliegt und durch ein von diesem zur Haut ziehendes schmales mediales Mesenterium einen engen, meist etwas gewunden verlaufenden Kanal entsendet, der an der Basis der Tentakel in der ventralen Mittellinie ausmündet. Vielleicht ist dieses Organ eine Statocyste.

Cölom. Bei erwachsenen Sipunculideen findet sich nicht die geringste Andeutung, daß das Cölom wie bei den Echiurideen

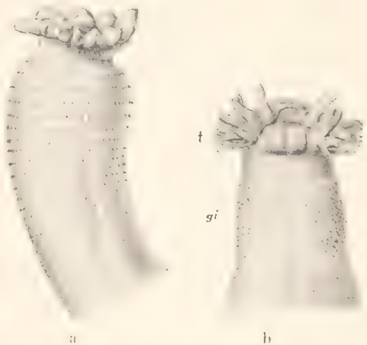


Fig. 10a. Vorderster Teil des Rüssels mit Tentakeln und Hakenkränzen von Phascolosoma elongatum. Seitenansicht. ca. 15 : 1. Nach Théel.

Fig. 10b. Dasselbe von Phascolosoma vulgare. Vom Rücken gesehen. Zwischen den Tentakeln t das Nuchalorgan, gi Haken. ca. 6 : 1. Nach Théel.

und Anneliden auch hier ursprünglich paarig gewesen sei. Wenn wir von dem ganz kurzen mesenteriumartigen Blatte absehen, durch das der Gang der Statocyste verläuft, ist nicht einmal das Bauchmark durch ein Mesenterium am Hautmuskelschlauche befestigt, sondern wird mit ihm nur durch die von ihm abgehenden Nerven verbunden. Eine weitere Eigentümlichkeit ist die Existenz eines von dem Rumpf-Rüsselcölom ganz

abgeschlossenen Cölomgefäßes (Fig. 11 cög), das auch dann nicht fehlt, wenn nur ganz rudimentäre Tentakel vorhanden sind. Immer ist auch dieses unpaarig, und selbst wenn, wie bei Sipunculus, ein zweites hinzukommt, so liegt dieses nicht zu seiner Seite, sondern dem nie fehlenden dorsalen gegenüber an der ventralen Darmwand.

Jedenfalls ein Teil der Zellen des Cölomepithels, und zwar sowohl des Hauptcöloms wie der Cölomgefäße, ist mit starken Wimpern ausgestattet, deren Tätigkeit die Cölomflüssigkeit mit den darin gelegenen Zellen in beständiger Bewegung erhält. Im Hauptcölom sitzen sie nicht nur der Außenwand an, sondern finden sich auch im Darmperitoneum. Bei Sipunculus und Physcosoma lösen sich gewisse dieser Wimperzellen einzeln oder zu mehreren von der Cölomwand als geschlossene kugel- bis schüsselförmige Blasen, sogenannte Urnen, ab und schwimmen mit den Cölomocyten in der Cölomflüssigkeit umher. Bei Phascolosoma finden sich „fixe Urnen" am Darmepithel, d. h. sich nicht ablösende wimperbesetzte Zellen. Die Funktion dieser in der verschiedensten Weise (irrtümlicherweise sogar als Parasiten) gedeuteten Gebilde ist bis jetzt nicht vollkommen aufgeklärt: in ihren Wimpern ballen sich zwar die aus der injizierten Ammoniakkarmin-Lösung ausgefällten Körnchen zusammen, werden aber nicht in das Innere der Urnen aufgenommen, und eine eigentlich phagocytäre Tätigkeit kommt nicht diesen, sondern nur gewissen Cölomocyten zu. Dies sind teils amöboide, teils etwa kugelrunde fixe Zellen, oft mit einem pigmentierten Körperchen im Innern oder mit Kristallen, in vielen Fällen auch hämoglobinhaltig, mit einem oder auch wohl zwei Kernen. Bei Sipunculus kommen außerdem auch verschiedene Zellenkomplexe (Scheiben usw.) vor.

Das Cölomgefäß ist oft mit kleinen oder größeren, nicht selten paarigen, bei Dendrostoma nur in geringer Zahl vorhandenen, aber sehr langen Blindsäckchen, sogenannten Zotten, versehen.

In Verbindung mit dem Cölom ist eigentümlicher Blättchen zu gedenken, die, etwas an die Dissepimente der Anneliden erinnernd, zahlreiche einander ungefähr parallele Scheidewände darstellen, die von der Innenfläche des Hautmuskelschlauches in das Cölom einspringen. Sie kommen nur bei gewissen Arten der Gattung Siphonosoma (cumanense-Gruppe) vor. Im größeren Teile des Rumpfes erstreckt sich jedes dieser „Septoide" von der Nähe des Bauchmarks

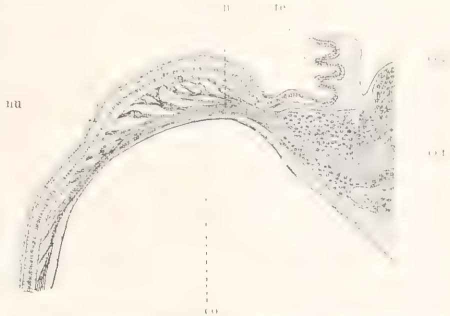


Fig. 11. Sagittalschnitt durch Gehirn (cer) und Nuchalorgan (nu) mit den dieses versorgenden Nerven (n) von Phascolosoma vulgare. cö Cölom; cög Cölomgefäß; te Tentakelepithel. Nach Cuénot.

bis etwa zur halben Höhe der Seitenwand. Eine Strecke hinter dem After gehen sie nicht mehr von der Innenfläche des Hautmuskelschlauches aus, sondern von einer etwa konzentrisch mit dieser hinziehenden sich bis auf den Rücken ausdehnenden „Septoidmembran", die ihrerseits durch Fäden oder Blättchen an jenem angeheftet ist. Diese Septoide haben eine netzförmige Beschaffenheit; Muskelfasern bilden keinen konstanten Bestandteil, und auch ihre Beziehungen zum Peritonealepithel sind einstweilen unklar, ebenso wie ihre Funktion.

Nephridien. Die Zahl der Nephridien ist bei gewissen Formen auf eines reduziert; doch hat in einigen Fällen die Untersuchung die Existenz eines Rudimentes des fehlenden ergeben (Moléanof). Der Sack ist entweder frei oder in wechselnder Ausdehnung am Hautmuskelschlauch befestigt.

Gonaden. Männliche und weibliche Gonaden sind gewöhnlich nicht zu unterscheiden, da die Loslösung der Geschlechtszellen sich schon auf einer noch indifferenten Stufe vollzieht; doch kann es auch vorkommen, daß die Eizellen als solche in der Genitalkrause charakteristisch werden. Im weiblichen Geschlecht sind die losgelösten, in der Cölomflüssigkeit flottierenden Eizellen meist entweder von Anfang an isoliert oder trennen sich sehr früh voneinander. Eine jede ist von anfangs wenigen, später etwas zahlreicheren platten Zellen (Follikel) umgeben, gegen den sich bald die Eizelle durch eine (oft von Poren durchsetzte) Dotterhaut

abgrenzt. Ehe die Reifung erfolgt, wahrscheinlich immer vor Eintritt der Eizellen in das Nephridium, findet die Abstoßung des Follikels statt. Auch jede Spermatogemme scheint von einer einzelnen, mit einem Follikel umschlossenen Zelle auszugehen, die sich aber bald in einen Zellenhaufen teilt, dessen Zellen geißeltragende Spermatogonien 2. Ordnung werden, die sich zu den Spermien umgestalten. Ein Spermatophor ist in den Spermatogemmen nicht vorhanden. Ihre Auflösung in freie Spermien geht vielleicht meist erst in den Nephridien vor sich, doch findet man solche bisweilen auch schon im Cölom.

Eine äußere Verschiedenheit der Geschlechter ist niemals beobachtet worden.

Lebensweise. Die Sipunculideen sind entweder Bewohner von Schlamm, gröberem oder feinerem Kalk- (oft Korallen-) oder Kieselsand (Sipunculus) oder werden in Bodenritzen aller Art angetroffen (Phascolosoma, Physcosoma usw.) oder bewohnen endlich allerhand röhren- oder gehäuseartige Hohlräume, als welche Schneckenschalen, Dentaliumröhren, Korallen, Schwämme usw. dienen (Phascolion, Aspidosiphon). Erstere füllen ihren Darm mit Bodenbestandteilen und dürften sich von deren organischem Inhalt ernähren, während die Vertreter der beiden letzteren Gruppen wohl von Mulm und dergleichen leben, den sie mittels des Tentakelapparates in den Mund befördern; diesen strecken sie weit hervor, ziehen ihn aber bei der leisesten Beunruhigung durch Kontraktion der Rüsselretraktoren ein. Einer freien Ortsbewegung dürften nur die Schlamm- und Sandbewohner fähig sein.

3. Systematik. Für die Einteilung in Gattungen sind vorzugsweise die Verhältnisse des Hautmuskelschlauches (je nachdem die Längsmuskelschicht in Bündel gesondert ist oder nicht), die Zahl und der Ursprung der Retraktoren, die Ausstattung des Rüssels mit Haken, die Beschaffenheit von Hautpapillen usw. für die Unterscheidung der Arten die Form, Größe usw. der Hautkörper, Haken, die Zahl der Längsmuskelbündel, bei Aspidosiphon, Cloeosiphon, Golfingia, Lithacrosiphon die Beschaffenheit des Eichel- und Analschildes entscheidend gewesen. Bei den Sipunculidae (Sipunculus, Siphonosoma, Dolichosiphon) ist neuerdings die wechselnde Ausbildung der cölomatischen Integumentalräume hinzugekommen. Physcosoma ist durch ausschließliche Entwicklung von Tentakeln um das Nuchalorgan gekennzeichnet und die meisten Arten der Gattung Sipunculus, abgesehen von der Besetzung des Rüssels mit schuppenförmigen Papillen, durch den Besitz einer mehr oder weniger tief und dicht eingekerbten Tentakelmembran. Bei allen übrigen Gattungen umgeben fingerförmige Tentakel kreisförmig das Vorderende des Rüssels (Siphonosoma, Dolichosiphon, Phascolosoma, Dendrostoma, Phascolion, Aspidosiphonidae).

4. Ontogenie und Regeneration. Bis jetzt liegen nur zwei eingehendere Untersuchungen von Hatschek (1873) über die Entwickelung von Sipunculus nudus und von Gerould (1906) über diejenige zweier Phascolosoma-Arten (Ph. vulgare und gouldi) vor. Die nur in letzterem Falle beobachtete Furchung, die zuerst meridional ist und 4 Blastomeren (3 kleinere und 1 sehr viel größere) liefert, geht darauf nach dem Spiraltypus vor sich, wodurch am animalen Pole eine vierzellige „Rosette“ gebildet wird, um die sich 8 zu je zweien die Schenkel eines Kreuzes bildende „intermediäre Zellen“ und in dessen Winkeln 4 Zellen eines „cross“ (wie bei Anneliden, Mollusken usw.) gruppieren. An diesen Zellenkomplex schließen sich äquatorialwärts die Zellen des Prototrochs (16 und einige akzessorische an), während die vegetative Hälfte von den Derivaten der 4 unteren größeren Blastomeren eingenommen ist, die die Telomesoblasten und das Entoderm liefern (Fig. 12). Bei Sipunculus nudus bildet sich aus den Prototrochzellen eine von Hatschek als Serosa bezeichnete der Dotterhaut anliegende Zellenhaut, die abgestoßen wird, wenn der Embryo jene abstreift und als Larve frei wird (Fig. 13). Durch fortgesetzte Teilung der Telomesoblasten entsteht jederseits ein Mesoderm- oder Keimstreifen, welche allmählich das Entoderm umschließen. Es bilden sich folgende Wimperapparate: auf der „Rosette“ ein Schopf sehr langer Wimperhaare, kürzere auf dem Prototroch bezw. der Serosa, etwas später hinter dem Munde sowohl bei Sipunculus wie bei Phascolosoma ein kräftiger „postoraler Wimperring“, während ein präanaler Paratroch den Larven beider Gattungen abgeht. Der Entoblastsack erhält vom Ektoblast aus Stomo- und Proctodäum. Tiefe Zellen der Scheitelplatte sondern sich von dieser als Gehirn ab, bewahren aber den Zusammenhang mit dem Ectoblast, und an der ventralen Seite entsteht als unpaarige mediale Einsenkung des Ectoblastes das Bauchmark. Zu den Seiten seines Vorderendes gelegene kleine Zellengruppen der Keimstreifen werden zu den Nephridien, die Hatschek als einen schleifenartig zusammengebogenen Kanal schildert, während sie nach Gerould als ein anfangs geschlossenes Bläschen auftreten, das später an seinem Vorderende eine Öffnung, das Nephrostom, erhält. Andeutungen einer Segmentierung

der Keimstreifen und des Bauchmarks (auf Längsschnitten) sind wohl nur als Folgen der Zusammenschiebung der Teile des Rumpfes zu beurteilen, der sich gleich nach der Sprengung der Dotterhaut erheblich streckt und dann keine Spur davon erkennen läßt. Der After liegt bei diesen eben frei gewordenen Larven etwas dorsal nahe dem Hinterende. Jetzt stellt die Phascolosoma-Larve in allem eine Trochophora dar, während derjenigen von Sipunculus (Fig. 14) der Prototroch fehlt und sie sich nur mittels des postoralen Wimperringes bewegt. Bei ersterer fließen die Prototrochzellen, nachdem sie ihre Wimpern verloren haben, zusammen und werden allmählich ins Innere des Körpers aufgenommen, wo sie ins Cölom gelangen. Das Wachstum der Larve erscheint hauptsächlich als eine Verlängerung des hinter dem After gelegenen Abschnittes, der ventral in seiner ganzen Ausdehnung vom Bauchmark eingenommen wird, während dorsal der After immer weiter vom Hinterende abrückt,

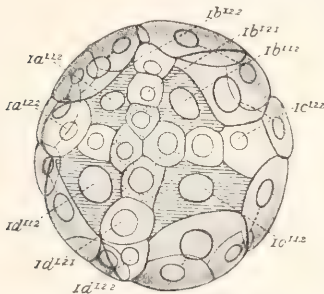


Fig. 12. Animale Hälfte des 48-Blastomeren-Stadiums von Phascolosoma vulgare. Punktiert: Rosette; nicht schattiert: intermediäre Zellen; quer schraffiert: Zellen des „cross". An der Peripherie die primären Prototrochzellen. Nach Gerould 1906.

so daß er schließlich am Vorderende des Rumpfes gelegen erscheint. Der Darm entsendet in den so auftretenden Hinterkörper eine Schleife, die zukünftige Darmspira. Die Retraktoren entstehen nach Gerould aus einigen Ectoblastzellen, die in den Zwischenraum zwischen dem Ectoblast und den Keimstreifen geraten und erst später in das Cölom hineingelangen. Der anfangs einen kurzen Kopflappen darstellende präorale Larvenabschnitt wird nach dem Schwunde des postoralen Wimperringes nicht wie bei den Echiurideen als ein „Rüssel" abgesetzt. Zu beiden Seiten des Mundes tritt davor ein Paar kleiner bewimperter Tentakelfalten auf. Noch im Ei hat sich ventral vom Munde bei Sipunculus eine Ectoblasteinstülpung gebildet, deren Grund von zwei fast kugligen Gruppen von Drüsenzellen gebildet (Dr); die Funktion dieses nach der Metamorphose

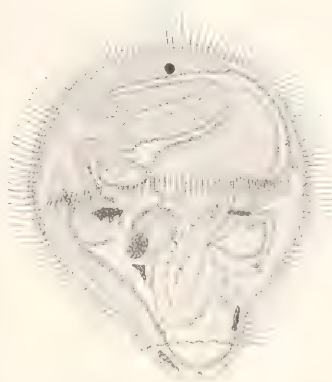


Fig. 13. Larve von Sipunculus nudus. Das Hinterende ein wenig aus der soeben gesprengten Eihaut hervortretend. ca. 280 : 1. Nach Hatschek.

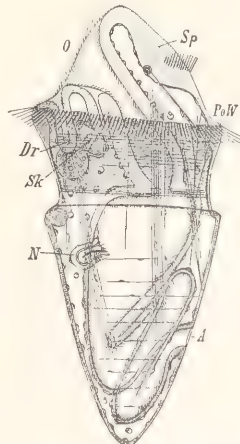


Fig. 14. Larve von Sipunculus medus. Seitenansicht. A After; Dr drüsiges Anhangsorgan des Oesophagus; N Nephridium; O Mund; PoW postoraler Wimperring; Sk „Schlundkopf"; Sp Scheitelplatte. Nach Hatschek. Aus Grobben.

verschwindenden Apparates ist unbekannt. Ebensowenig kennt man Bedeutung und Schicksal eines zwischen dem letzterwähnten und dem Oesophagus gelegenen von Hatschek als Schlundkopf beschriebenen bläschenförmigen Organs (Sk), das auf eine Faltung der Oesophaguswand zurückgehen soll; vielleicht ist es die Anlage des Cölomgefäßes.

Regeneration des hinteren Körperabschnittes ist bei Siphonosoma beobachtet worden. Es tritt vollständiger Ersatz des durch Verletzungen verloren gegangenen Teiles ein, meistens mit Ausschluß der Darmspira und des aus ihr hervortretenden hinteren Stückes des Spindelmuskels.

Fossile Reste aus dem bayerischen lithographischen Schiefer sind unter dem Namen Epitrachys als möglicherweise Sipunculideen darstellend beschrieben worden.

Literatur. ***Keferstein,*** *in Z. wiss. Zool., Bd.* 15, *1865, und Bd.* 16, *1866.* — ***Selenka, De Man und Bülow,*** *Die Sipunculiden; in Semper, Reisen im Archipel der Philippinen, Bd.* 4, *1888.* — ***Stuiter,*** *in Natuurk. Tijdschrift nederl. Indie, Bd.* 41 *bis* 45, *1881/87.* — ***Théel,*** *Northern and arctic Invertebrates. I. Sipunculids, in Svensk. Vet.-Akad. Handl., Bd.* 39, *1905.* — ***Spengel,*** *in Verh. zool. Ges., 1912.* — *Anatomie von Sipunculus nudus:* ***Andreae,*** *in Z. wiss. Zool., Bd.* 36, *1881.* — ***Ward,*** *in Bull. Mus. comp. Zool. Harvard Coll., Vol.* 21, *1891.* — ***Vogt und Yung,*** *Lehrbuch der vergleichenden Anatomie, Bd.* 2, *1889/94.* — ***Metalnikoff,*** *in Z. wiss. Zool., Bd.* 86, *1900.* — *Ontogenie:* ***Hatschek,*** *in Arb. zool. Inst. Wien, Bd.* 5, *1883.* — ***Gérould,*** *im Zoologischen Jahrbuch, Bd.* 23, *Anat., 1906.*

J. W. Spengel.

Skelett der Tiere.

Wirbellose und Wirbeltiere.

Allgemeiner Teil. A. Skelett der Protozoa. B. Skelett der Metazoa. I. Skelett der Wirbellosen. 1. Skelett der Porifera. 2. Cnidaria. 3. Platodes, Nematodes, Rotatoria. Nemertina, Chaetognatha, Acanthocephala. 4. Annelida. 5. Bryozoa. 6. Brachiopoda. 7. Echinodermata. 8. Mollusca. 9. Arthropoda. 10. Tunicata. II. Skelett der Wirbeltiere. 1. Allgemeiner Teil. Hautskelett. 2. Wirbelsäule und Chorda. 3. Rippen und Brustbein. 4. Schultergürtel. 5. Beckengürtel. 6. Gliedmaßenskelett. 7. Schädelskelett.

Allgemeine Bemerkungen. Begriffsbestimmung. Skelett (vom griechischen σκελετός = ausgetrocknet, vertrocknet, τὸ σκελετόν = ein ausgetrockneter Körper, eine Mumie) hatte in der älteren Zoologie nicht die Bedeutung, die wir jetzt damit verbinden. Ursprünglich verstand man darunter ein Wirbeltiergerippe, doch ist der Begriff Skelett in der modernen Zoologie sehr erweitert worden. Man versteht zurzeit unter dem Begriff „Skelett oder Körpergerüstwerk" „die Gesamtheit aller vorkommenden toten Hartteile oder noch lebenden Hartgewebe im oder am Tierkörper, die aus Zellen, Zellprodukten oder verarbeiteten Fremdkörpern bestehen, durch organische oder anorganische Stoffe besonders erhärtet oder damit imprägniert sind und die eine Stütz-, Schutz- und Bewegungsfunktion erfüllen oder erfüllen können". Es sind die Skelettbildungen im Tierreich so mannigfacher Art, daß es unmöglich ist, eine Charakteristik zu geben, die für alle absolut gültig ist. Je größer und komplizierter die Tierkörper werden, um so mehr nimmt das Bedürfnis zu nach besonderen Stützapparaten. Dieser Notwendigkeit wird in ganz verschiedener Weise entsprochen. Gewisse Zellgruppen passen sich dieser Arbeitsteilung an und scheiden zwischen sich Substanzen ab, die ihrer Natur und Struktur nach dem Festigungsbedürfnis entsprechen. Durch Zellumwandlungen aller Art, durch Faserbildung, durch Einlagerung von Mineralsalzen, durch Verkittung von Fremdkörpern kommt die ungeheuere morphologische und histologische Mannigfaltigkeit der Skelettbildungen zustande, die in ihren wichtigsten Formen im folgenden besprochen werden sollen.

Die Herkunft der skelettbildenden Zellen. Diese ist verschieden; die Zellen können 1. dem äußeren Keimblatt entstammen (z. B. die die Cuticula bildenden Epidermiszellen der Gliedertiere) oder 2. dem inneren Keimblatt (z. B. Chorda dorsalis der Rundmäuler) oder 3. dem mittleren Keimblatt (z. B. die knochen- und knorpelbildenden Zellen der Wirbeltiere).

Exo- und Entoskelette. Ihrer Entstehung nach kann man zwei Skelettarten unterscheiden: a) Unter den Exo- oder Außenskeletten wollen wir alle die verstehen, welche sich auf die Tätigkeit der Epidermiszellen zurückführen lassen, sei es, daß die Epidermis die Skelettsubstanz selbst produziert (z. B. Schalen der Mollusken), sei es, daß Fremdkörper durch Epidermissekrete verkittet werden (z. B. Wurmgehäuse). b) Unter den Ento- oder Innenskeletten verstehen wir alle die Skelettgebilde, die auf die Tätigkeit mesenchymatischer resp. mesodermaler und entodermaler Zellen zurückzuführen sind (z. B. Chorda; Kalkplatten der Stachelhäuter). Exo- und Entoskelette treten vielfach in engste Beziehung, zumal wenn ihre Funktion dieselbe ist, z. B. bei Schildkröten verbinden sich die ektodermalen Hornplatten aufs engste mit den meso-

dermalen Knochenplatten und bilden gemeinsam den schützenden Panzer.

Wachstum und Beweglichkeit. Die starren Skelette schützen und festigen wohl vorzüglich, hindern aber andererseits das Wachstum und die Beweglichkeit. Man findet auch Tiere mit ganz starren Skeletten bewegungsunfähig (z. B. Glasschwämme; manche Ascidien). Ferner können zwar starre Skelette durch Anfügung neuer Teile vergrößert werden (z. B. Schneckenschalen), aber es kann kein Wachstum stattfinden, bei dem alle Maße des Körpers allseitig fortschreitend an Größe zunehmen. Wenn also Wachstum durch Zwischenlagerung neuer Substanz (sogenannte Intussusception) nicht möglich ist, so wird das Skelett in mehrere Teile zerlegt, welche durch nichtstarre Gewebsstücke (Gelenke) miteinander verbunden sind, und das Wachstum kommt durch Anlagerung (Apposition) an den Endflächen zustande (Beispiel für Intussusception: das Knorpelgewebe; für Apposition: der Seeigelpanzer). — Das Zerlegen der starren Skelette in mehrere Teile fördert selbstverständlich die Bewegungsfunktion, indem an den einzelnen Teilen Muskeln ansetzen und die Teile als Hebel wirken. Die durch die Zerlegung in mehrere Teile entstehenden Gelenke sind nach verschiedenen Typen gebaut; a) bei den Gliedertieren sind harte Teile des Hautskeletts durch elastische und dünne Gelenkhäute direkt verbunden und Gelenkringe kommen an den Rändern in Berührung (z. B. Krebsfuß); b) bei den Wirbeltieren, Seesternen u. a. stoßen die Skelettstücke mit Endflächen aneinander, meist unter Bildung eines Gelenkkopfes und einer Gelenkgrube. Elastische Bänder stellen die Verbindung (Gelenkkapsel) her, und die Gelenkschmiere erhält die Flächen glatt und vermindert die Reibung. Die Form und Bewegungsfreiheit der Gelenke ist sehr verschieden. Die beiden Haupttypen sind a) Scharnier- oder Winkelgelenke, die nur eine Bewegung zulassen (z. B. Ellenbogengelenk, Fußgelenke der Insekten) oder b) Kugel- und Sattelgelenke, die mehrere meist kreisförmige Bewegungen gestatten (z. B. Kopfgelenk der Libellen; Oberarmgelenk).

Die Funktion der Skelette ist eine dreifache. Erstens erfüllen sie eine Stützfunktion, besonders die Ento- oder Innenskelette; zweitens dienen sie dem Schutzbedürfnis, besonders die Exo- oder Außenskelette; drittens werden sie zu Bewegungsapparaten, indem sie als Hebel den Körper vorwärtsschieben und den Muskeln Ansatzflächen zur besseren Wirksamkeit gewähren. Welche Funktion die primäre ist, ist nicht immer mit Sicherheit entscheidbar. Muskeln und Nerven bezeichnet man als aktives Motorium; die Skelette als passives Motorium oder passiven Bewegungsapparat.

Was die räumliche Anordnung der Skelettelemente anbelangt, so kann man unterscheiden: a) unsymmetrisch gelagerte Skelettelemente, die regellos im Körper verteilt sind (z. B. viele Kalkspicula der Seegurken), b) radialsymmetrisch geordnete (z. B. Radiolarienskelette), c) monaxon gelagerte (z. B. röhrenförmiges Wurmgehäuse), d) bilateralsymmetrische Skelettbildungen (Glieder-Wirbeltierskelette). Während also die stützenden oder schützenden Teile in manchen Fällen regellos im Körper verteilt sind (z. B. Hornschwammgerüst), entsprechen sie andererseits streng den Anforderungen von gewissen Symmetrieebenen.

A. Skelettbildungen der Protozoa.

Als Vorstufe der Skelettbildung ist die Pellicula zu nennen; eine erhärtete, mehr oder minder elastische Schicht des Ektoplasmas. Sie dient zum Schutz in erster Linie, bietet aber auch vielfach Ansatzpunkte für kontraktile Fibrillen. Die Oberfläche kann durch Rillen, Höcker, Leisten usw. noch besonders versteift sein. Bei Fortpflanzungsvorgängen wird die Pellicula entsprechend ihrer protoplasmatischen Natur mit eingeschmolzen und bleibt nie als leere Hülle zurück. — Alle übrigen echten Skelettbildungen sind auf Sekretionsvorgänge des Plasmas zurückzuführen und daher chemisch und morphologisch scharf von der lebendigen Substanz unterscheidbar. Sie sind tot und bleiben bei der Fortpflanzung als leere Hüllen, Gehäuse, Schalen, Skelette im engeren Sinne zurück. Die kaum übersehbare Fülle dieser Gebilde dienen alle der Schutz- oder Stützfunktion. Eine Sonderfunktion besitzen noch die reichgegliederten Skelette der planktonischen Protozoen: sie erhöhen die Schwebefähigkeit dieser Formen.

a) Hüllen: dem Plasma eng anliegend; aus Pseudochitin (Awerinzeff) oder Cellulose bestehend. Entweder ist die vielfach mit Skulpturen versehene Hülle einheitlich oder sie setzt sich aus Einzelplatten zusammen. Oeffnungen und Poren in den Platten vermitteln die Verbindung mit der Außenwelt (Fig. 1).

b) Stiele: besonders bei festsitzenden Flagellaten verbreitet. Sie bestehen aus Hüllsubstanzen oder sind in manchen Fällen (z. B. Heliozoen) verkieselt.

c) Schalen oder Gehäuse: sie entstehen α) wenn sich die organische Grundsubstanz stark mit mineralischen Substanzen (z. B. Calciumkarbonat; amorphe Kieselsäure) imprägniert und sich das Plasma nach

der Sekretion von der Gehäusewand etwas zurückzieht, so daß ein Zwischenraum zwischen beiden entsteht oder β) wenn die organischen Hüllsubstanzen mit Fremdkörpern, Sandkörnern, Schalen anderer Einzelliger fest zu einem bestimmt geformten Gebilde verbacken (sog. agglutinierte Schalen, z. B. Difflugia, Fig. 2, D).

Die Schalen der Rhizopoden erreichen eine erstaunliche Fülle der Komplikation, doch sind die Schalen meist monaxon. Der eine Schalen(Gehäuse-)pol ist offen und läßt den Plasmaleib hervorquellen. Die Form kann z. B. becher-, glocken-, urnenförmig sein. Am mannigfaltigsten sind die Schalen der marinen Foraminiferen. Hier findet kann durch Runzeln, Dornen, Leisten noch mannigfach kompliziert werden.

d) Innenskelette: sind in eine den Plasmaleib umhüllende Gallertmasse eingebettet und reichen zum Teil in den plasmatischen Teil hinein. Es gibt hier sowohl Skelettformen, die einheitlich sind, als auch solche, bei denen Skeletteile nur lose in der Gallertmasse, aber in bestimmter Anordnung, liegen. Besonders Heliozoen und Radiolarien bringen Innenskelette zur Ausbildung. Diese Gebilde bestehen aus Kieselsäure oder wie bei den Acantharien aus Strontiumsulfat. Von losen Skelettstücken findet man Nädelchen (Spiculae), massive Kugeln, solide und hohle Stäbe. Von den

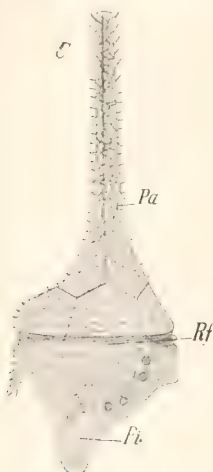


Fig. 1. Ceratium hirundinella. Dinoflagellata. Mit Hülle aus Einzelplatten (Cellulose). Pa alte Platten, Rf Ringfurche mit Geißel; Pi nakter Teil noch ohne Platten. Junges Tier kurz nach der Teilung. Nach Doflein.

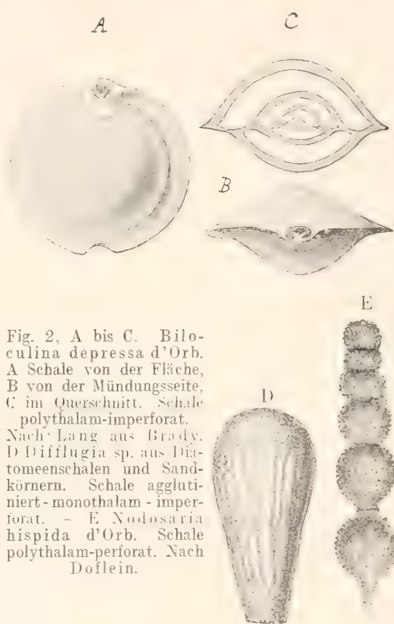


Fig. 2, A bis C. Biloculina depressa d'Orb. A Schale von der Fläche, B von der Mündungsseite, C im Querschnitt. Schale polythalam-imperforat. Nach Lang aus Brady. D Difflugia sp. aus Diatomeenschalen und Sandkörnern. Schale agglutiniert-monothalam-imperforat. – E Nodosaria hispida d'Orb. Schale polythalam-perforat. Nach Doflein.

man die Gehäusewand entweder solid (Imperforata, Fig. 2, A bis C) oder von Poren durchsetzt (Perforata, Fig. 2, E). Die Schale ist ferner einkammerig (Monothalamia, Fig. 2, D) oder vielkammerig (Polythalamia, Fig. 2, A bis C, E). Bei den Vielkammerigen quillt infolge Wachstums das Plasma aus der letzten Kammer periodisch heraus und legt eine neue Kammer an, die bis auf die Größe der vorhergehenden ähnlich ist. Das Außenrelief aller Schalen einheitlichen Skelettformen sind die einfachsten Gitterkugeln, von denen eine weitere Komplikation der Skelette ausgeht. Bei der ungeheueren Fülle der Innenskelettformen können nur Typen der vier großen Radiolariengruppen kurz besprochen werden.

In der Gruppe der Peripylaria (Spumellaria; Fig. 3) treten mehrere ineinander geschachtelte Gitterkugeln auf, die sich gegenseitig stützen durch radiale Stäbe. Noch komplizierter wird das Skelett, wenn

die äußeren Gitterkugeln nur teilweise ausgebildet werden, die Radialstäbe sehr lang sind und allerlei Fortsätze erhalten. Etwas anders ist der Typus der Gruppe der Monopylaria (Nassellaria). Hier kommt es zu den seltsamsten, helm-, kronen-, käfig-, glocken-, schirmartig gestalteten Skeletten. Bei der Gruppe der Tripylaria (Phaeodaria) ist die Mannigfaltigkeit eine noch größere (Fig. 4 u. 5). — Einen von den vorhergehenden Typen abweichenden Bau zeigen die Skelette der Gruppen der Acantharia. Die hier doppeltlichtbrechenden Nadeln bestehen nach Bütschli aus Strontiumsulfat ($SrSO_4$). Die Nadeln sind gesetzmäßig (sogenanntes Müllersches Gesetz) radiär zusammengestemmt und vielfach im Zentrum verwachsen (Fig. 6). Sie ragen in den kapsulären Teil hinein und haben selbst Platten, peripher liegende Auswüchse, Fort-

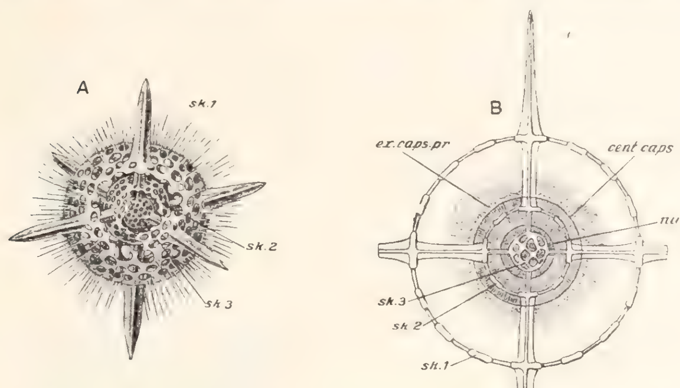


Fig. 3. Actinomma asteracanthion Hckl. Peripylaria. A die ineinandergeschachtelten Gitterkugeln, sk.1—sk.2—sk.3 (zum Teil aufgebrochen), sind durch radiale Stäbe gestützt. B Schnitt durch das Tier mit Schale; cent.caps. Centralkapsel, ex.caps.pr. extrakapsulares Plasma, nu Zellkern. Hier reicht das Skelett bis in den plasmatischen Teil hinein. Nach R. Hertwig und Haeckel.

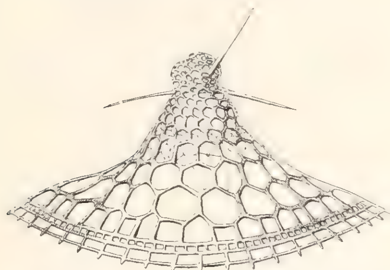


Fig. 4. Eucecryphalus Gegenbauri Hkl. Monopylaria. Skelettansicht. Nach Haeckel.



Fig. 5. Euphysetta elegans Borg. Skelett. Tripylaria. Nach Doflein.

sätze usw., vielfach auch in besonderen Zahlenverhältnissen. Die Formenfülle ist auch hier eine erstaunliche.

B. Skelettbildungen der Metazoa.

Gegenüber den Skeletten der Einzelligen ist hier die Mannigfaltigkeit und Verschiedenheit der Skelette und der Skelettelemente eine noch viel größere, was seinen Grund in der größeren Kompliziertheit des Metazoenkörpers hat.

I. Skelette und Skelettelemente der Wirbellosen. Evertebrata.

Man findet Außen- und Innenskelette, bisweilen beide zugleich. Die Skelettsubstanzen können organischer Natur sein (z. B. Chitin, Zellulose, Conchiolin)

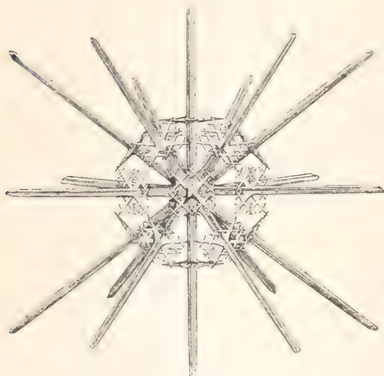


Fig. 6. Xiphacantha spinulosa Hckl. Acantharia. Die 20 großen Stacheln sind zentral verwachsen und haben periphere Querfortsätze. Das eine Stachelpaar senkrecht zur Bildebene. Nach Haeckel.

oder anorganischer, mineralischer Natur (z. B. kohlensaurer, phosphorsaurer Kalk, amorphe Kieselsäure), endlich treten bei einer großen Zahl von Skeletten organische und anorganische Substanzen in innigster Vermengung gemeinsam auf (z. B. Krebspanzer aus Chitin und kohlensaurem Kalk). Als negatives Merkmal aller Skelette der Evertebrata ist das völlige Fehlen von Knochen zu nennen. Knorpel kommt, wenn auch in beschränktem Umfange, vor (z. B. Cephalopoda).

1. Skelette der Schwämme. Porifera. Spongia. Mit wenigen Ausnahmen findet man bei allen Spongien Skelette und zwar bestehen diese aus Kalknadeln (Calcispongia), Kieselnadeln (Silicispongia) oder aus Hornfasern (Ceraospongia). Ihrer chemischen Zusammensetzung nach bestehen die Nadeln (Spicula) aus kohlensaurem Kalk oder amorpher Kieselsäure. Die Horn-(Spongin-)fasern sind organischer Natur, aber nicht mit dem Horn der Wirbeltiere identisch. Die Nadeln entstehen im Innern von mesenchymatischen Zellen. Die Hornfasern sondern syncytiale Zellkomplexe ab (sogenannte Spongioblasten). Die Kalknadeln sind massiv, die Kieselnadeln zeigen meist einen organischen Achsenfaden. Bei manchen Schwämmen liegen die Nadeln nur lose nebeneinander, bei anderen dagegen verbinden sie sich zu einem mehr oder minder festem Gefüge auf zweierlei Weise: a) die Nadeln verkitten sich durch Kieselsubstanz — auf diese Art entstehen die völlig starren Gitterskelette der Glasschwämme (Fig. 7)



Fig. 7. Pheronema carpenteri. Kieselglasschwamm. Verkleinert. Nadeln durch Kieselsubstanz zum Teil fest verklebt. Nach W. Thomson.

oder b) die Nadeln verkleben durch Spongin (Fig. 8).

Dem geometrischen Bau nach hat man im wesentlichen drei Nadeltypen zu unterscheiden a) einachsige Nadeln, Monactellida, die Nadel ist ein einfacher Stab, bisweilen S-förmig gebogen oder bedornt (Fig. 9, 5), b) dreiachsige Nadeln, Triaxonia, Triactinellida, auch Hexactinellida, drei Achsen stehen aufeinander senkrecht. Die Enden können verzweigt sein (Fig. 9, 7),

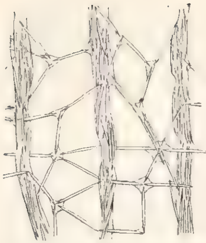


Fig. 8. Kieselnadeln durch Spongin verklebt. Nach Boas.

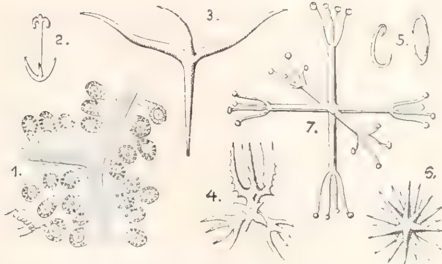


Fig. 9. Skelettstücke von Schwämmen. 1. Fasern eines Bade-(Horn)schwammes mit Spongioblasten, 2. bis 7. Kieselnadeln in verschiedener Ausbildung. Aus Kükenthal, Zoologisches Praktikum.

c) vierachsige Nadeln, Tetractinellida, vier Achsen stoßen unter verschiedenem Winkel zusammen (Fig. 9, 5). Alle diese Grundformen können vielfach modifiziert sein und so findet man besonders bei Kieselschwämmen Sterne, Spangen, Kugeln, besenförmige Gebilde usw. (Fig. 9, 6). Bei Kalkschwämmen findet man besonders ein-, drei-, vierstrahlige Nadeln.

Kommt es zu immer stärkerer Entwickelung der Hornsubstanz und zum Schwund der Nadeln, dann entstehen die Faserskelette der Hornschwämme, von denen unser gewöhnlicher Badeschwamm ein Vertreter ist (Fig. 9, 1). — Verschiedene Nadelformen kommen zusammen vor, aber nicht Kiesel- und Kalknadeln. Auch sind die verschiedenen Nadeln im Schwamm räumlich in bestimmter Anordnung gelagert. Die Größe der Spicula schwankt zwischen ½ m bis zu mikroskopischer Kleinheit.

2. Skelette der Nesseltiere. Cnidaria. Die Skelettbildungen dieser Gruppe lassen sich auf zweierlei Ursprung zurückführen. Einmal auf die Epidermis- und dann auf Mesenchymzellen, in beiden Fällen kommen sie zu reicher Entwickelung. Vornweg ist zu bemerken, daß bei Hydrozoen zwischen Ekto- und Entoderm eine Stützlamelle vorhanden sein kann, deren Herkunft unsicher ist. Von den Bildungen, die der Epidermis zukommen, ist das Peridermskelett zunächst zu nennen. Es ist eine feste cuticulare Schicht, die das Tier allseitig umhüllt und mannigfache Formentwickelung (Hydrotheca, Gonotheca, Hydrocaulus) zeigt, welche zur typischen Gestaltung und zur Festigung der Kolonien wesentlich beiträgt (Fig. 10). Die Hydrocoralliae lagern Kalk im Periderm ab und so kommen massive, korallenähnliche Stöcke zustande. — Mesenchymatischen Ursprungs sind die Skelettelemente der Octocoralliae. Die oft lebhaft



Fig. 10. Stück einer Hydroidenkolonie, nur das Peridermskelett zeigend. H Hydrotheca, G Gonotheca. Nach Nutting.

gefärbten Kalkkörper (Scleriten, Sclerodermiten, Fig. 11, A) liegen dicht gedrängt

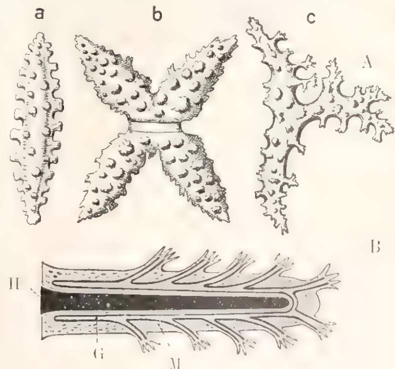


Fig. 11. A Sclerodermiten von Octokorallen, B Schema der Lagerung der Hornachse bei Gorgoniden. Ho Hornachse, G Gastralkanäle, M Mesoderm. Nach Bütschli.

unverbunden oder verkitten sich durch andere Kalkmassen, so bildet sich z. B. das Skelett der Edelkoralle und das Rumpfwandskelett der Orgelkoralle (Tubipora).

Ektodermaler Natur sind die Hornskelette der Gorgoniaceae, aber es ist die Hornsubstanz (Cornein) nicht mit dem Horn der Wirbeltiere identisch. Bei manchen Gorgoniden findet eine Kombination von Horn und Calciumkarbonat statt. Die Hornachse (Fig. 11, B) ist tief in die Kolonie eingeschoben, aber stets von Epidermis umhüllt. Die starken, weitverzweigten, dabei porösen Skelette der Hexacoralliae sind ektodermaler Natur und bestehen vorwiegend aus kohlensaurem Kalk. Zunächst bildet der Polyp ein basales Fußblatt. Von dieser aus schieben sich, die Körpermasse vor sich herdrängend, die weiteren radiär und peripher gestellten Skeletteile in den Körper gleichsam ein und wiederholen in ihrer Anordnung teilweise die Architektur des Tieres. Von der Basalplatte erheben sich die Sclerosepten (Fig. 12, A), die zwischen den Gastralsepten Tabulae (Querplatten) ab. Es müssen nicht alle aufgeführten Skeletteile auftreten. Andererseits verwachsen die Einzeltiere zu Kolonien, die in ihrem Wuchs typisch für jede Art sind.

3. Skelettbildungen der Plattwürmer (Platodes), Rädertiere (Rotatoria), Pfeilwürmer (Chaetognatha), Rundwürmer (Nemathelminthes), Schnurwürmer (Nemertina), Kratzer (Acanthocephala). In allen diesen Gruppen spielen Skelettelemente nur eine untergeordnete Rolle. Als Skelettbildungen finden wir a) eine mehr oder minder dicke und derbe Cuticula, die der Epidermis entstammt, b) Chitinstäbe und -haken im Körperinnern, besonders als Mundbewaffnung und zur Versteifung der Saugnäpfe, c) Kalkspicula als Hilfsapparate an den Genitalorganen des ♂, d) Kalkkörperchen im parenchymatischen Gewebe und e) Gehäuse aus Chitin, eventuell mit Fremdkörpern.

Bei den Platodes sind die Saugnäpfe am Scolex vielfach mit chitinigen Haken bewaffnet, wie z. B. das Rostellum der Band-

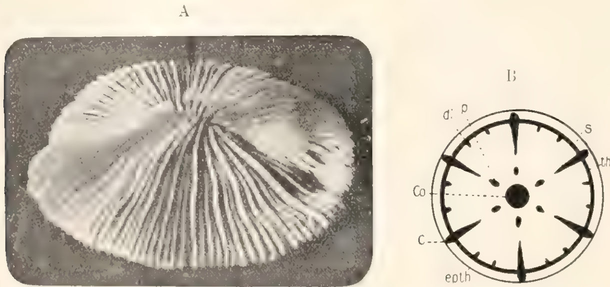


Fig. 12. A Fungia Danai H. Kalkskelett mit sehr gut entwickelten Sklerosepten. B Schematisches Bild der Lagerung der Skeletteile eines Korallenpolyps. Co Columella, C Costae, di Dissipimente, epth Epitheca, p Pali, s Sklerosepten, th Theca. Nach H. E. Ziegler.

liegen. Am Rand verwachsen letztere zum Mauerblatt oder Kelch (Theca). Im Zentrum erhebt sich die Columella (Säule), und vielfach noch sogenannte Pali (Pfähle) im Radius der Hartsepten liegend. Ueber die Theca hinaus ragen Rippen (Costae). Außerhalb der Theca legt sich oft eine Epitheca an. Weitere Komplikationen im Skelett bilden die Dissipimente und Synaptikeln (Stäbe), die alternierend oder verbindend zwischen obengenannten Skelettstücken sich finden, allerdings nicht immer (Fig. 12, B). Die Tabulae kommen durch Wachstumsvorgänge zustande. Der Polyp baut oben die Theca immer weiter und schließt die verlassenen Teile durch genannte würmer (Fig. 13, C). Auch findet man bei letztgenannter Gruppe im Körper massenhaft ovale und runde mikroskopische kleine Kalkkörper verstreut; chitiniger Natur sind die Rüsselhaken der Acanthocephalen (Fig. 13, B), die Mundzähne mancher Nematoden, die Fangborsten der Chaetognathen, die Mundskelette der Nemertinen und der Kauapparat der Rotatorien. Die derbe, schützende und stützende Cuticula dieser letztgenannten Gruppe ist vielfach mit Leisten und Stacheln versehen und gleichfalls chitinig. Am deutlichsten tritt die Schutzfunktion der Cuticula bei den Rädertieren zutage, besonders bei der Abteilung der Loricata (Fig. 13, A).

Hier ist der Rumpfabschnitt mit einem

festen, für jede Gattung typischen chitinösen Panzer umkleidet. Die Außenfläche des Panzers kann getäfelt sein oder ein mannigfaches Relief zeigen. Die Abteilung der Gasterotricha bildet die Cuticula oft in Form eines Schuppenkleides aus. Koloniebildende Rädertiere, aber auch Einzelformen, bauen sich teilweise chitinige Röhren, bisweilen den räuberischen Formen sehr gut entwickelt; was die Borstenform anbelangt, so findet man haar-, pfeil-, lanzett-, sichel-, stabförmige usw. Gebilde, einfache und zusammengesetzte Borsten, kräftige innere Stützborsten (Aciculum) (Fig. 14, B). Die Kalkröhren werden meist von Bauchdrüsen aus abgesondert, was ihre Form anbelangt, so



Fig. 13. Skelettelemente von niederen Würmern. A Panzer eines Rädertieres von der Dorsalseite. B Rüsselbewaffnung (Chitinhaken) eines Kratzers. C Chitinhaken vom Rostellum eines Bandwurms. A Nach Rousselet. B Nach Lüke. C Nach Braun.

unter Zuhilfenahme von Fremdkörpern (sogenannte Gehäuse).

4. Skelette der Ringelwürmer (Annelida). Zu den Skelettbildungen sind zu rechnen a) die mannigfach gestalteten Chitinborsten der Parapodien, b) die ebenfalls chitinigen Ober- und Unterkiefer der Chaetopoden, c) die chitinigkalkigen Kieferplatten vieler Hirudineen (Fig. 14, E), d) die Gehäusebildungen in Form von chitinigen oder kalkigen Röhren, auch können diese unter Zuhilfenahme von Sand und anderen Fremdkörpern aufgebaut sein.

Die Kieferbewaffnung (Fig. 14, A) ist bei

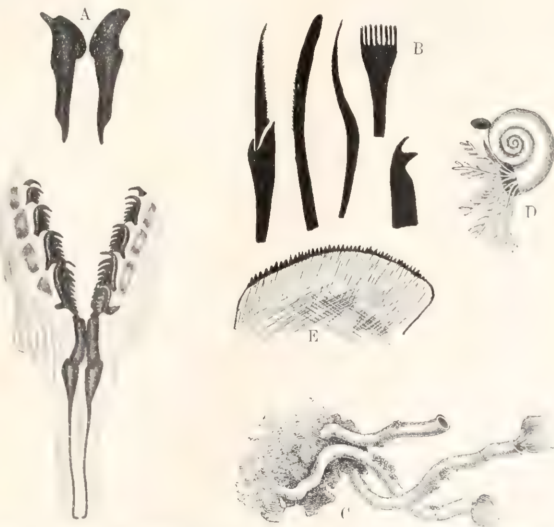


Fig. 14. Skelettbildungen der Anneliden. A Unter- und Oberkiefer von Cirrobranchia parthenopeia. B Einfache und zusammengesetzte Borsten von Polychaeten $^{300}/_{1}$ (nach Ehlers A u. B). Kalkröhren von Protula. C, u. Spinorbis D; nach Leunis-Ludwig. E Kiefer vom Blutegel.

können sie gerade oder gebogen, ja sogar spiralig wie Schneckenschalen aufgerollt sein (z. B. Spirorbis). Viele der röhrenbauenden Anneliden leben kolonieweise und die Röhren sind zu massigen Stöcken ineinander verschlungen (Fig. 14, C).

5. Skelette der Bryozoa. Es ist ein cuticulares Skelett vorhanden. Die Einzeltiere sitzen in einem Gehäuse (Zoöcium), dessen Cuticula hornig, chitinig oder verkalkt sein kann. Meistens vereinigen sich die Tiere zu zierlichen Stöcken von hydroidenähnlichem Aussehen. Namentlich die kalkigen Stöcke (z. B. Retepora) sind ziemlich hart (Fig. 15).



Fig. 15. Skelett einer marinen Bryozoenkolonie. Entalophora idmoneoides. Die röhrigen Gehäuse der Einzeltiere sind fest miteinander verwachsen zu einem Stück. Nach Calvet.

6. Skelette der Brachiopoda. An Skelettbildungen findet man a) die zweiklappige Schale, b) das Tragskelett der Mundarme, c) reichverzweigte Kalkspiculae im Mantel und Armen. — Die Schale besteht aus zwei den Muscheln äußerlich ähnlichen Schalen, die aber dorsal und ventral gelagert sind. Sie werden vom Mantel ausgeschieden, sind cuticularer Natur und mit Kalksalzen stark imprägniert. Durch ihren Bau lassen sie sich mikroskopisch sofort von Muschelschalen unterscheiden. Es fehlt nämlich die Perlmutterlage und dann sind sie von Porenkanälchen durchsetzt, die oft nach außen hin sich verzweigen (Fig. 16, D). Auch können Horn- und Kalkschichten abwechseln (Fig. 16, C).

Der morphologische Bau der Schalen ist etwa folgender: Die Ventralschale ist tiefer gewölbt und greift hinten schnabelartig über die Dorsalschale über. Sie läßt ein Stielloch frei, welches nach vorn durch 2 Platten (Deltidium) abgeschlossen wird. Bei der Gruppe Testicardines sind an dieser Stelle Schloßzähne vorhanden, den Ecardines fehlt das Schloß. — Die Dorsalschale ist flacher, zeigt Einbuchtungen für die Zähne (Schloßgruben) und einen Schloßfortsatz, der an der Ventralschale eingreift. Weiter trägt diese Schale das mannigfach, oft spiralig, gebaute Armskelett (Fig. 16, A und B), welches den Ecardines auch fehlt. — Im Mantel und in den Armen finden sich stark verzweigte, dornige Kalkspicula, die ein förmliches Netz bilden können.

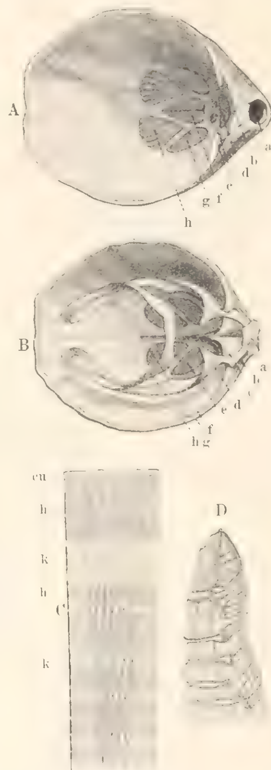


Fig. 16. Bau der Brachiopodenschalen. A und B Magellanea flavescens. A Ventralschale von innen. a Stielloch, b Deltidium, c Schloßzahn, Ansatz des Stieles d, der Schließer f, der Oeffner e, h; B Dorsalschale von innen, a Schloßfortsatz, b Zahngrube, c Schloßplatte, d Schenkel des Armgerüstes, Ansatz der Schließer e, f, Medianseptum g, Armgerüst h; C Querschliff durch die Schale von Lingula murphiana (Vergr. 200), cu Cuticula, h Horn-, k Kalkschichten mit feinen Poren; D Querschliff der Dorsalschale von Crania anomala (Vergr. 50). Zwei Kalkschichten mit verzweigten Poren. Nach Stromer von Reichenbach.

7. Skelette der Stachelhäuter (Echinodermata). In dieser Gruppe findet man ein ganz typisches, morphologisch wie histologisch scharf charakterisiertes Skelett, das seiner chemischen Zusammensetzung nach hauptsächlich aus kohlensaurem Kalk besteht. Die Skelettelemente können in dreifacher Ausbildung auftreten: a) als lose Kalkgebilde von mannigfachster Form, b) als beweglich verbundene Kalkplatten, c) als feste aneinander gepreßte Platten. — Aber immer bildet sich das Skelett im mesodermalen Bindegewebe. Es ist ausgezeichnet durch seinen maschigen spongiösen Bau. Die Maschen oder das „Balkenwerk", wie man es auch bezeichnet, ist durchsetzt von den es bildenden Zellen (Fig. 17). Dem

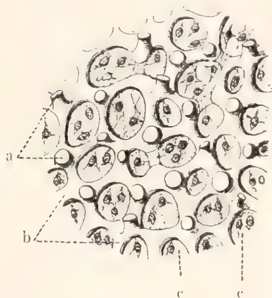
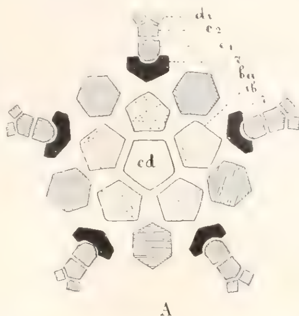


Fig. 17. Schematischer Schnitt durch Skelettgewebe eines Schlangensternes. In den Maschen das Bindegewebe, a aufsteigende, b horizontale Bälkchen des Kalkskeletts, c Bindegewebszellen. Nach Bütschli.

sogenannten „Steinkanal" sind Kalkkonkremente in die Wandungen eingelagert.

7a) Crinoidea, Haarsterne. Man hat ein Stiel-, Kelch- und Armskelett zu unterscheiden. Der Stiel besteht aus 5-eckigen Platten, denen die ebenfalls mit Skelettstücken versehenen Cirren ansitzen (Fig. 18, B). Der Kelch (Calyx) wird durch cyklisch angeordnete Platten gebildet (Fig. 18, A). Von unten gesehen kommt zunächst ein Centrodorsale dann bisweilen 5 radiäre Infrabasalia, daran schließen sich die 5 Radialia an, welche sich in Costalia und endlich in Distichalia fortsetzen. Interradial liegen die 5 Basalia. Die keilförmigen Armglieder bezeichnet man auch als Brachialia. Die Kelchoberseite ist unregelmäßig getäfelt, doch finden sich oft 5 interradiale Oralia (Fig. 18, B).

7b) Asteroidea, Seesterne, Ophiuroidea, Schlangensterne. Ihr Skelett zeigt manche Uebereinstimmung. Die Platten sind beweglich, das Apicalskelett ist nur in der Jugend deutlich ausgeprägt. Typisch ist das Armskelett; es zeigt hintereinander liegende Platten. Bei den Ophiuroideen sind die Ambulacralplatten verschmolzen



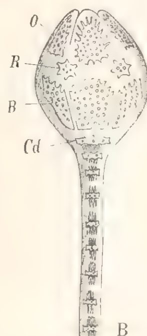


Fig. 18. Skelettstücke der Haarsterne. A Kelchplatten von Marsupites, cd Centrodorsale, ib Infrabasalia, ba Basalia, r Radialia, c_1 c_2 Costalia, di Distichalia; B junger Antedon, o Oralia, B Basalia, R Radialia. Nach Lang und Seeliger.

(sogenannte Wirbel) und mit Gelenkhöckern versehen. Seitlich davon liegt je eine Reihe Seitenschilder (Marginalia), während die Rücken- resp. Bauchseite eine Reihe entsprechend benannter Schilder einnehmen (Fig. 19, B). Die Seesterne haben an Stelle der Bauchschilder paarige Adambulacralplatten, anschließend an die echten Ambulacralplatten. Seitlich liegen Marginalia; die Supraambulacralia (nicht stets vorhanden) stützen die Ambulacralia (Fig. 19, A). Das Mundskelett bilden bei beiden Gruppen die Peristomalplatten. Den Endabschluß der Arme gibt die Terminal- oder Ocellarplatte. Als akzessorische lose Skelettelemente finden sich Stacheln, Pedicellarien, Paxillen (Fig. 19, A), welche auch über die Hautoberfläche hinausragen.

7c) Echinoidea, Seeigel. Das Hauptskelett bildet eine feste kugelförmige, aus



Fig. 19. Armskelette von See- und Schlangensternen. A Querschnitt des Armes von Asteropecten; 1 Radialkanal, 2 Ampulle, 3 Füßchen, p Paxillen, sm Supra-, im Inframarginalia, sa Supra-, ad Adambulacralia, am Ambulacralia. B Querschnitt des Armes einer Ophiure; am verwachsene Ambulacralia, ds Dorsalschild, m Marginalia, bs Bauchschild. Nach Lang.

Platten zusammengesetzte Schale. Nur um das Peristomfeld (Mund) lagern sich lose Stücke. Vom Apicalfeld aus ziehen 10 meridionale Doppelreihen, bei denen durchlöcherte Ambulacralia (Radien) mit Interambulacralia (Interradien) wechseln. Das After(Apical-)feld wird von 5 großen interradialen Genitalplatten umsäumt, eine davon ist zugleich Madreporenplatte; dann folgen 5 radiale Ocellarplatten (Fig. 20, A). Bei den Irregulares sind die 10 Doppelreihen auch vorhanden, aber symmetrisch verschoben und abgeändert (petaloide Formen). Außer diesem Plattenskelett finden sich noch allerlei akzessorische Skelettelemente, z. B. die Greifzangen (Pedicellarien; Fig. 20, C), Stacheln, vertikale Stützpfeiler bei sehr flachen Formen usw. Sehr kompliziert ist das Mundskelett der regulären Seeigel, welches auch (wie schon manche Ophiuren) glasurartige Zähne besitzt (Fig. 20, B).

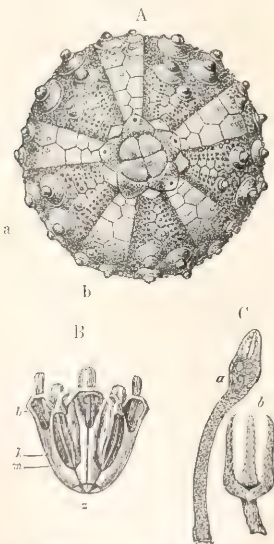


Fig. 20. Skelettstücke von Seeigeln. A Seeigel (Coelopleurus) nach Entfernung der Stacheln, die auf den Höckern beweglich sitzen, a Ambulacra in den Ocellarplatten endend, b Interambulacra in den Genitalplatten endend. Afterfeld hier aus vier großen Platten bestehend. B Kauapparat von Strongylocentrotus, b Bügelstücke, k Kiefer, m Muskeln, z Zähne. C Pedicellarien geschlossen und offen. R. Hertwig, Lehrbuch der Zoologie.

7d) Holothurioidea, Seegurken. Mikroskopisch kleine, aber massenhaft dem Hautmuskelschlauch eingelagerte isolierte Kalkkörper bilden hier in der Regel das Skelett. Ihrer sehr mannigfachen Form nach bezeichnet man sie als „Anker, Rädchen, Stühlchen, Platten, Dornen“ usw. (Fig. 21). Wenige Holothurien (z. B. Psolus) besitzen ein festes Plattenskelett. Als Stützapparat der Mundhöhle findet sich ein massiver Kalkring.

Den Larvenformen der Stachelhäuter kommen lange kalkige Stützelemente zu, die später wieder eingeschmolzen werden. Sie dienen auch als Schwebeapparate dieser pelagischen Formen.

8. Skelette der Weichtiere (Mollusca). In dieser sehr umfangreichen und vielgestaltigen Gruppe finden sich Skelettbildungen mannigfaltiger Art und in chemisch wie histologisch recht verschiedener Zusammensetzung. Die wichtigsten Skelettelemente seien aufgezählt: a) Schalen, einheitlich oder aus zwei und mehreren Stücken bestehend; in die organische Grundmasse

(Conchin oder Conchiolin) wird hauptsächlich kohlensaurer Kalk in kristallinischer Form (Kalkspat und Aragonit) eingelagert; b) das Operculum oder der Deckel bei manchen Gasteropoden, hornig oder kalkig, die Schalenmündung verschließend; c) Kalkstacheln und schuppige kalkige Gebilde bei Amphineuren; d) hornige (Chitin oder Conchin?) Kiefer nebst einer Reibzunge (Radula) mit Zähnchen (chitinig) als Kau-



Fig. 21. Kalkkörper von Holothurien. 1 Anker mit Platte, 2 und 6 Stühlchen, 3 Kreuze, 4 und 7 Stäbchen, 5 und 8 Gitter, 9 Rädchen. Nach Lang.

apparat, sie fehlen den Muscheln; e) Knorpelkomplexe als Stütz- und Schutzgebilde besonders bei Cephalopoden; f) Kristallstiele (kalkig) als Anhangsgebilde im ♂ Genitalapparat bei Schnecken; g) Chitinringe und -haken zur Aussteifung der Saugnäpfe vieler Cephalopoden; h) Kalkröhren, ausgeschieden als sekundäre Schalenbildungen vom Mantel; i) knorpelig-hyaline Schalen bei pelagischen Schnecken; k) Kalkspiculae. Alle diese Skelettbildungen kommen natürlich nicht immer zusammen vor, so ist in vielen Fällen die Schale rudimentär oder das Operculum fehlt usw. Der Uebersichtlichkeit halber sollen die Hauptgruppen einzeln besprochen werden.

8a) Amphineura. Wir finden 8 einzelne Schalenstücke, die sich dachziegelartig derart decken, daß der Hinterrand der vorderen Schalen dem Vorderrand der nächstfolgenden aufliegt. Jede Schale besteht aus 2 Schichten, der oberen freiliegenden (Tegumentum) und der unteren verborgenen (Articulamentum), welche seitliche Fortsätze (Apophysen) hat. — Das Tegumentum ist mit Poren durchsetzt, das Articulamentum ist kompakt. Die Schalenstücke sind ventral einrollbar. Außerdem finden sich kalkige Schuppen, Borsten, Stacheln und Kalkspicula, letztere besonders bei der Gruppe der Solenogastres. Eine Radula ist meistenteils vorhanden (Fig. 22, A und B).

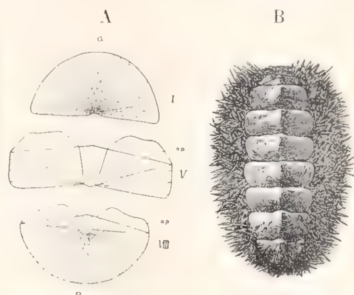


Fig. 22. Skelettstücke von Amphineuren. A drei Schalen von Chiton und zwar I., V., VIII. Stück, ap Apophysen, a vorn, p hinten. B Chiton spinosus. Von oben; 8 Schalenstücke und Stacheln am Mantelrand. Nach Lang-Hescheler. Nach Cooke.

Die Gruppe der Scaphopoda wollen wir hier erwähnen, obwohl sie systematisch sich nicht anschließt. Sie zeigt eine turmförmige, beiderseits offene Schale, von elefantenzahnähnlicher Gestalt (z. B. Dentalium).

8b) Lamellibranchiata, Muscheln. Während hier Radula und Kiefer immer fehlen, finden sich bis auf wenige Ausnahmen 2 Schalenstücke, die symmetrisch rechts und links vom Mantel abgeschieden werden. Es lassen sich meist 3 Schichten am Querschliff unterscheiden: a) die cuticulare Außenschicht, das Periostracum ohne Kalkeinlagerung; vielfach geht sie im späteren Leben verloren; b) die mittlere Prismenschicht (Ostracum), auch Porzellanschicht genannt; in die organische Grundmasse ist kohlensaurer Kalk in prismatischen, senkrecht zur Oberfläche gestellten Säulen abgelagert; c) die Perlmutterschicht (Hypostracum) aus lamellös geschichteten Kalkplättchen bestehend, mit lebhaftem Farbenspiel. Die Perlen zeigen die Perlmutterschicht nach außen liegend in konzentrischer Schichtung (Fig. 23, B). — An der Schale lassen sich noch Zähne in verschiedenster Ausbildung feststellen; sie bilden in ihrer Gesamtheit das Schloß. Es kann je nach der Zahnform heterodont oder taxodont sein, um nur die beiden Haupttypen zu nennen. Das elastische Ligament sperrt die Schalen auseinander, es ist wohl nur eine verdickte

Stelle des Periostracums (Fig. 23, A). Als besondere Skelettgebilde sind die kalkigen Röhren zu nennen, die manche bohrenden Formen, z. B. Teredo navalis ausscheiden um die verlängerten Siphonen; auch kommen bei dieser Gattung noch eigenartige Skelettstücke, sogenannte „Paletten“ vor.

8c) Gasteropoda, Schnecken. Die Schale ist hier bis auf wenige Ausnahmen ein-

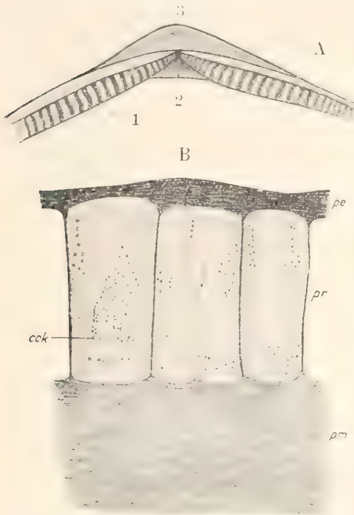


Fig. 23. Skelettelemente der Muscheln. A Taxodontes Schloß. 1 Schloßzahn, 2 Ligament, 3 Wirbel. B Querschliff der Schale einer Teichmuschel. pr Prismenschicht, pm Perlmutterschicht, pe Periostracum, cck Conchiolinkügelchen. A Nach Lang. B Nach Rassbach.

heitlich, d. h. ein Gehäuse, und es kann die Mündung durch einen Deckel (Operculum), der hornartig oder kalkig ist, noch besonders verschlossen werden (Fig. 26, A). Die Aufrollung der Schale ist ja typisch für die meisten Schnecken und sie kann als Kegelspirale oder in einer Ebene vor sich gehen. Meist sind die Gehäuse rechts-, seltener linksgewunden. Die Schalenformen sind von außerordentlicher Mannigfaltigkeit. An der typisch gebauten Schale lassen sich folgende Teile unterscheiden a) die Spitze (Apex), b) die Windungen selbst (Spira), c) die Verwachsungslinie der Windungen in der Nahtlinie (Suturlinie), d) die Mündung (Apertura) eventuell ausgezogen zur Siphonalröhre oder aufgewulstet zum Mundrand (Peristom), e) die Spindel (Columella), um welche die Windungen gedreht sind, f) der Nabel (Umbo; Fig. 24).

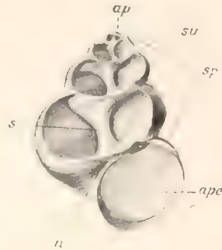


Fig. 24. Schale einer Paludina. Angeschliffen. ap Apex, su Suturlinie, sp Spira, s Columella, ape Apertura, n Nabel. Nach Boas.

Was die Struktur der Schale anbelangt, so finden wir meist nur 2 Schichten, vor allem ist die Prismen(Porzellan-)schicht dominierend; ihre feinere Struktur ist sehr verschieden, ebenso wie die des Operculums. Die Außenschicht (Periostracum) fehlt vielfach. — Knorpelelemente finden sich am Mund, besonders als Stütze der Zunge. Ebenso verschieden wie die Schale ist der Bau der chitinigen Kiefer (Fig. 25, C) und der Radula (Reibzunge) mit ihren Zähnchen, deren Anordnung systematisch wichtig

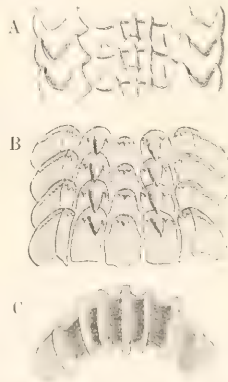


Fig. 25. Verschiedene Radulae mit Zähnen. A von Eburna japonica, B von Cyclostoma elegans, C Kiefer von Helix pomatia. A nach Cooke, C nach Meisenheimer, B nach Lang-Hescheler.

ist. Die mittleren Zähne der Radula sind die rhachialen, die seitlichen die Lateralzähne (auch Pleurae), die äußersten die Marginalzähne (Uncini) (Fig. 25, A und B). Seltener innerhalb dieser großen Gruppe auftretende Skelettbildungen sind noch die zarten (Chitin oder Conchin?) Schalen mancher pelagischer Formen oder die knorpelig-gallertigen, glashellen Sekundärschalen mancher Pteropoden (z. B. Cymbulia). Ganz eigentümliche Skelettbildungen sind die sogenannten Kristallstiele oder Liebespfeile mancher Pulmonaten (Fig. 26, B, C und D). Es sind Hilfsapparate

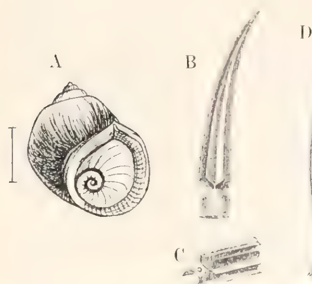


Fig. 26. A Lithoglyphus naticoides. Mündung mit spiraligem Operculum verschlossen. Liebespfeile von Helix hortensis B Totalansicht, C Querschnitt, von Helix nemoralis D. A nach R. Hertwig, B bis D nach Lang.

bei der Begattung und werden in einem besonderen Sack gebildet. Endlich sind noch nadelähnliche Kalkspicula, im Mantel und Fuß liegend, als Skelettform zu nennen, die aber auch nicht überall auftreten.

8d) Cephalopoda, Tintenfische. Die Schalenausbildung ist recht verschieden. Die Tetrabranchiata (Nautilus) besitzen eine gekammerte Schale. Die jüngsten Windungen umhüllen die älteren völlig. Der apicale Teil des Tieres wird zum Sipho und so der hinterste Teil der Schale als Wohnraum unnötig; er wird daher durch Septen (Scheidewände) abgekammert und füllt sich mit Luft. Die jüngste Kammer ist die Wohnkammer. Die Einrollung der Schale ist dorsalwärts erfolgt (Fig. 27). Die Schalenstruktur ist etwa folgende: die Perlmutterschicht ist nicht sehr dick und überzieht auch die Septen. Die Prismenschicht (Porzellanschicht), auf der noch eine dünne Außenschicht liegt, bildet die Hauptmasse. Die Dibranchiata zeigen nur bei Spirula eine kleine, aber dem Nautilus ganz entsprechend gebaute Schale. Bei manchen Formen fehlt die Schale oder der „Schulp" gänzlich oder er ist dünn und nur in horniger Beschaffenheit entwickelt. Typisch gebaut ist der Schulp von Sepia, der sich aus der ge-

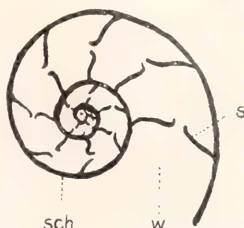


Fig. 27. Schnitt durch die Schale von Nautilus. Schematisch. sch Schalen Außenseite, W Wohnkammer, s Septum mit dem Siphonalloch. Hinter der Wohnkammer die leeren Luftkammern.

kammerten Schale der †Belemniten herleiten läßt. Am Schulp ist das Rostrum sehr klein, kopfwärts setzt es sich in die Rückenplatte fort, auf der lamellös geschichtete Kalksepten liegen (Fig. 29, b). Eine richtige Kammerung fehlt. An anderen Skelettbildungen findet man bei den Cephalopoden hornig-chitinige (oder Conchin-?) Kiefer, die wie ein Papageischnabel gestaltet sind, sowie ein Radula mit Zähnen (Fig. 28, A und B).

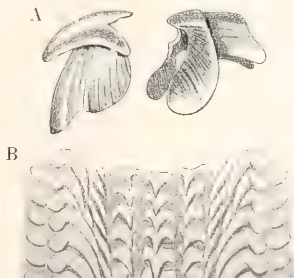


Fig. 28. Kiefer A und Radula (zum Teil) B eines Tintenfisches. Nach R. Hertwig und Boas.

Auch Knorpelbildungen treten bei den Cephalopoden auf und zwar in ziemlicher Ausdehnung in den einzelnen Körperregionen. Wir finden bei Nautilus „Kopfknorpel" zum Ansatz des Schalenmuskels. Bei den Dibranchiaten trifft man Kopfknorpel, an dem seitlich die „Augenknorpel" ansetzen. Davor liegt der „Armknorpel". Hinter dem Kopfknorpel liegt der „Nackenknorpel", der sich

in den „Rückenknorpel" fortsetzt. Schließlich stützt vielfach die Seitenflossen ein entsprechend benannter Knorpel (Fig. 29, a). Auch in dem Trichter, den „Gruben" und den „Knöpfen" (Schließapparat der Mantelhöhle) trifft man Knorpelelemente, ebenso

Fig. 29. Sepia. a Schema für die Anordnung des Knorpelskeletts und der Schulps in sogenannter Dorsalansicht, b Längsschnitt des Schulps von der Seite gesehen. Nach Bütschli.

in der Zunge. Als besondere Stützelemente der Saugnäpfe finden wir Ringe und Haken von chitinig-horniger Beschaffenheit.

9. Skelette der Gliedertiere (Arthropoda). Diese außerordentlich umfangreiche Gruppe zeigt im Gegensatz zu ihrer morphologischen Vielgestaltigkeit eine Einförmigkeit in der Skelettbildung. Bei allen hierhergehörigen Gruppen (Crustaceen, Arachnoideen, Eutracheaten, Insekten, Protracheaten, Pantopoden) finden wir ein cuticulares Exoskelett, welches den Körper und seine Glieder überzieht in verschiedener Dicke, und sich in den Körper hinein als Ueberzug des Vorder- und Enddarmes oder als Tracheen fortsetzt. Das Skelett besteht aus Chitin, welches vielfach, besonders bei den Crustaceen, durch Einlagerung von Kalksalzen noch besonders erhärtet, und soll mit feinen Poren durchsetzt sein (?). Es ist ein Abscheidungsprodukt der Epidermiszellen (Hypodermis- oder Matrixschicht) und zeigt geschichteten Bau (Fig. 30, A). Während des Wachstums wird es erneuert und das alte zu enge Skelett wird als zusammenhängende Haut (Exuvie) abgeworfen, sogenannte „Häutungen". — Die die inneren Organe (Darm) zum Teil überkleidende Chitinhaut bezeichnet man als Intima. Die weit verzweigten Tracheen sind cuticulare Einstülpungen und zeigen spiraligen Bau (Fig. 32, C). Als Außenanhänge findet man Borsten, Schuppen, Haare, Fäden, Dornen, Haken usw. in großer Mannigfaltigkeit. An den Segmentgrenzen wird der feste Hautpanzer unterbrochen durch weiche Verbindungshäute und es kommt zur Ausbildung von Gelenken, die nach anderem Typus als die der Wirbeltiere gebaut sind (Fig. 30, B und C), insofern als Gelenkkapseln fehlen.

Fig. 30. A Schnitt durch die Haut und den Panzer von Cancer pagurus, c Cuticula, pl Pigmentlage, c u. pl der ganze Panzer P; m Matrix. B Bindegewebe. Nach Pearson. B Schema der Arthropodengelenke in verschiedener Ansicht. Die dunklen Stellen sind die harten unbeweglichen Teile, welche die Scharniere (Zapfen und Gruben) bilden. Die hellen Stellen sind die weichen biegsamen Gelenkhäute, aber auch chitinös. Nach Boas veränd. C Schema der Ringelung des Körpers. Vier Ringe mit den Gelenkhäuten, die eingestülpt sind. Nach R. Hertwig.

Ein genaueres Eingehen auf die Morphologie des Arthropodenskelettes, welches gleichbedeutend ist mit der Morphologie des Gliedertierkörpers überhaupt, ist an dieser Stelle des Handbuches nicht möglich, es ist dies den betreffenden Sonderartikeln über die einzelnen Gruppen zugeteilt. In keiner Gruppe geht die Differenzierung des Körpers überhaupt mit der des Skeletts so Hand in Hand wie hier. Es soll deshalb hier nur das Allerwichtigste behandelt werden und besonders die Verhaltnisse, wo es sich um besonders markant ausgeprägte Skelettgebilde handelt. Als Vertreter der Branchiaten mit chitinig-kalkigem Skelett sollen einige Crustaceen behandelt werden. Als Vertreter der Tracheaten wird das Skelett der Coleoptera ausgewählt, zumal hier Bezeichnungen üblich sind wie in der Wirbeltierreihe.

9a) Branchiata, Crustacea. Abgesehen von parasitären Formen ist überall das Hautskelett gut entwickelt und besonders bei den höheren Krebsen durch starke Kalkeinlagerung sehr fest geworden. Bei niederen Krebsen (Entomostraca) sind die Segmente noch frei, bei höheren (Malacostraca) dagegen ist vielfach Kopf und

Brust durch eine feste einheitliche Schale bedeckt (sogenannter Cephalothorax), der sich oft nach vorn in ein spitzes Rostrum verlängert. — Eine symmetrische, zweiklappige muschelähnliche, mit Schloß und Ligament versehene, das ganze Tier einschließende Schale haben die Muschelkrebse (Ostracoda: Fig. 31, C und D). Die Schale erfüllt hier in erster Linie eine Schutzfunktion. Die markantesten Skelettbildungen zeigen die Rankenfüßler (Cirripedia) und hierauf soll etwas näher eingegangen werden. Diese Formen wachsen im Alter mit dem Kopfe fest und der ganze Körper umgibt sich mit einer Chitinschale, in der sich ganz bestimmte Kalkplatten ausbilden. Die Kalkplatten (mit besonderem Namen) erlangen bei den Balaniden eine enorme Mächtigkeit und hüllen den gesamten Körper völlig ein. Bei Lepas finden wir am Körper 2 Scuta, 2 Terga und eine dorsale Carina (Fig. 31, A und B). Bei Scalpellum und anderen Formen finden sich an der Stiel-Körpergrenze paarige Lateralia, Scuta und Terga sowie unpaarig ein Rostrum und eine Carina. Bei den Balaniden sind Lateralia, Carina und Rostrum ganz fest verschmolzen zu einem Schalenkranz, der Stiel fehlt hier und nur Scuta und Terga sind beweglich, der ganze Körper sitzt einer ebenfalls kalkigen Basalplatte auf. Bei den ektoparasitären Formen (Coronula) sind die Kalkplatten zu einer Röhre umgestaltet. Kalkschuppen und -stacheln treten als Anhangsgebilde am Stiel vielfach auf (Fig. 31, A).

9b) Tracheata. Von den Tracheaten wählen wir aus der Gruppe der Insekten die Käfer aus und geben eine kurze Beschreibung ihres Chitinskeletts als Typus eines Exoskeletts der Tracheaten. Es sind 3 Körperabschnitte, Kopf, Brust, Hinterleib, vorhanden. Der Kopf (Caput) mit 4 Gliedmaßenpaaren (Antennen, Mandibeln, 1. und 2. Maxille), die vielfach verschmelzen. Nach Analogie des Wirbeltierkopfes unterscheidet man Gesicht, Stirn, Hinterhaupt usw. Die Brust ist dreigliederig und trägt ventral 3 Beinpaare, dorsal 1 oder 2 Flügelpaare, die eventuell fehlen. Die 3 Brustringe (Pro-, Meso-, Metathorax) setzen sich aus verschiedenen Teilen zusammen mit besonderen Namen. Dorsal das Notum, ventral das Sternum, seitlich die Pleuren. Die Flügel (Elytren) sind vielfach verschieden gebaut und sitzen nie am 1. Brustring. Am Fuß unterscheidet man: die Hüfte (Coxa) am Thorax ansitzend, den Schenkelring (Trochanter), Oberschenkel (Femur), Schienbein (Tibia) und Fußglieder (Tarsus) mit Endklauen (Fig. 32, A und B).

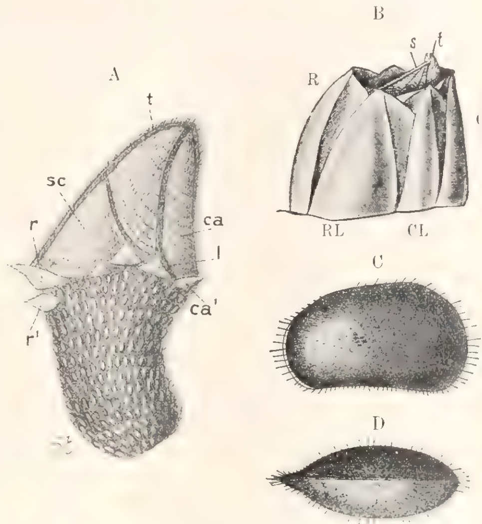


Fig. 31. Skelette der Cirripedia A und B und Schale eines Ostracoden C. t Tergum, S, sc Scutum, C, ca Carina, ca_1 Subcarina, R r Rostrum, r_1 Subrostrum, L Lateralia, St Stiel, RL Rostro-, CL Carinolaterale. A Scalpellum villosum, B Balanus Hameri. Nach Darwin. C Muschelkrebs (Candona rostrata). Von der Seite, D Von oben. Schale hier mit Borsten. Nach Vávra.

Der Hinterleib (Abdomen) ist immer ohne Extremitäten und setzt sich aus teleskopartig ineinander geschobenen Ringen zusammen.

Die Spinnentiere (Arachnoidea) haben ähnlich den höheren Krebsen einen Cephalothorax mit 4 Beinpaaren und 2 Paar Mundgliedmaßen.

Die hierher gehörigen Skorpione besitzen ein mehrgliederiges Postabdomen mit Giftstachel und bei den Milben ist Abdomen und Cephalothorax zu einem Stück verschmolzen. Die Protracheaten und Myria-

poden haben dagegen viele gleichartige Segmente mit Fußpaaren.

Anhangsweise wären noch die vielfach vorkommenden Gehäuse zu nennen, die sich manche Larvenformen (besonders z. B. Köcherfliegen) bauen aus Gespinstfäden unter Zuhilfenahme von allerlei Fremdkörpern. Während der Puppenruhe nimmt das Hautskelett besondere (tonnenähnliche) Form an, ebenfalls in größter Mannigfaltigkeit der morphologischen Ausbildung.

10. Skelette der Manteltiere (Tunicata). Von Gebilden, die Skelettfunktion besitzen, treten auf: a) die Chorda dorsalis (Rückensaite) als Stütze des Ruderschwanzes. Festsitzenden Formen kommt die Chorda nur im Jugendleben zu, die freilebenden Copelata haben sie dauernd; b) der Mantel (Tunica) aus zellulosehaltiger Grundmasse (Tunicin) bestehend, wir zählen ihn zu den Skelettbildungen im weiteren Sinne. Er ist ein Epidermisprodukt und dient besonders da, wo er hartlederartig wird, als Schutzorgan. Zur Erhöhung der Festigkeit lagern viele Tunicaten Fremdkörper aller Art (Sand, Muschelstücke, Kieselnadeln) ein. Eigenartig durch hornartige Platten ist die Gattung Chelyosoma gepanzert (Fig. 33, A); c) die Spicula, stern-, nadel-, dornenähnliche Gebilde, wohl aus kohlensaurem Kalk, durchsetzen den Mantel und erhärten ihn. Sie ähneln in der Form den Spiculae anderer Gruppen, und finden sich oft massenhaft eingelagert (Fig. 33, B, C und D).

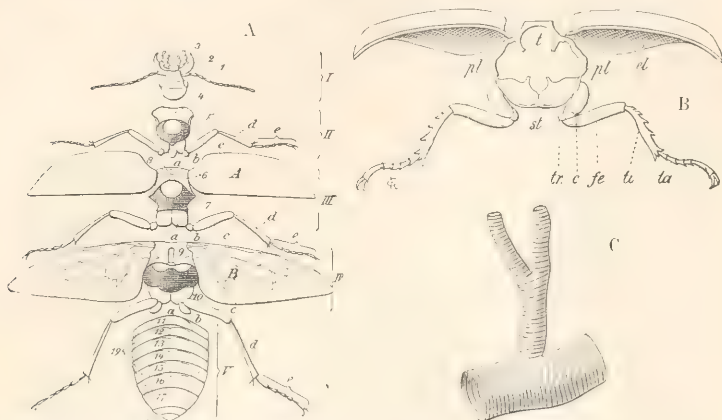


Fig. 32. Exoskelett eines Insekts (Käfer; A und B). A Wichtigste Teile Kopf, Brust und Hinterleib, auseinandergezogen. I Kopf, II erster Brustring Prothorax, III Mesothorax, IV Metathorax, V Abdomen. 1 Antennen, 2 Mandibeln, 3 Taster der 1. Maxille, 4 Pronotum, 5 Prosternum, 6 Mesonotum, 7 Mesosternum, 8 Schildchen, Scutellum, 9 Metanotum, 10 Metasternum, 11 bis 17 Rückenschienen, 18 Afterdecke (Pygidium) des Abdomens, 19 Oeffnungen (Stigmen) der Tracheen; a Coxa; B (c) | b Trochanter; B (tr) | c Femur; B (fe) | d Tibia; B (ti) | e Tarsus; B (ta); A Vorderflügel hier als harte Decke (Elytrum); B (el) entwickelt; | B Mesothorax im Querschnitt, Tergum t, Sternum st, Pleuren pl; C Stück einer verästelten Trachee. A und C nach Leunis und Ludwig. B nach R. Hertwig.

II. Skelette der Wirbeltiere (Vertebrata).

Allgemeine Bemerkungen. Das Wirbeltierskelett ist durch die reiche Entwickelung von Knorpel und Knochen charakterisiert, welch letztere Gewebsart dieser Gruppe allein zukommt. Man kann morphologisch wie genetisch unterscheiden: a) das Exo- oder Außen- auch Hautskelett; es verbleibt ständig im Bereich des Integumentes und legt sich sofort knöchern an; b) das Ento- oder Innenskelett; es entsteht knorpelig oder knöchern mehr in der Tiefe, die knorpelig vorgebildeten Teile immer in der Tiefe.

Die Gesamtheit aller Knorpelteile bezeichnet man als Primordialskelett. Dieses ist typisch für den Embryonalzustand höherer Formen und findet sich dauernd bei niederen Gruppen (z. B. Haie).

Zum Hautskelett zählt man herkömmlicherweise auch alle oft umfangreichen Verhornungen

der Epidermis, zumal sie zum knöchernen Hautskelett meist in innige Beziehungen treten. Der Begriff Exoskelett wie er bei Vertebraten gebraucht wird, deckt sich also nicht ganz mit dem, wie er in der Einleitung festgelegt wurde.

Die Bildung der entoskelettalen Knochen kann auf zweierlei Weise vor sich gehen. Einmal entstanden im Anschluß an die Hautverknöcherungen Knochen, die in die Tiefe sanken, sich auf das Knorpelskelett legten und mit diesem sich sekundär verbanden. Es sind dies die Deck- oder Belegknochen (= Ossa investientia oder Allostosen). Zweitens kann ein Knochen entstehen auf Kosten des Knorpels. Bildet sich der Knochen unter Beteiligung der Knorpelhaut (Perichondrium) mehr peripher, so spricht man von perichondraler Ossifikation oder



Fig. 33. Skelettbildungen der Tunicata. A Chelyosoma Macleayanum mit dem Plattenskelett, mp Mittelplatte, rp Randplatten, sp Siphonalplatten, i Einfuhr-, e Ausfuhröffnung. B C D. Spicula aus dem Mantel von Leptoclinum B C, von Cystodites D. Vergr. $^{500}/_{1}$. Nach Seeliger.

Ekchondrostose — bildet er sich mehr in der Mitte von enchondraler Ossifikation oder Enchondrostose. Die zweite Art der Entstehung gibt die Ersatz- oder Knorpelknochen (Ossa substituentia oder Autostosen). In beiden Fällen kommt es zu einem ganzen oder teilweisen Ersatz des Knorpels.

Phylogenetisch sind die Deckknochen die älteren, es ist daher irreführend, sie als sekundäre Knochen zu bezeichnen, ebenso wie es nicht präzis ist, sie Hautknochen zu nennen. Die Frage, ob ein Knochen Deck- oder Ersatzknochen ist, stößt vielfach auf große Schwierigkeiten. Wir kennen besonders am Teleosteerschädel Knochen, die in dieser Hinsicht doppelter Natur sind und daher als Mischknochen bezeichnet werden.

Ontogenetisch treten bei beiden Knochenarten kleine lokale Verknöcherungen (Ossifikationszentren, Knochenkerne) auf; es kann auch eine Verkalkung des Knorpels oder des Bindegewebes vorangehen. Die Knochenbildner heißen Osteoblasten. Große Knochen besitzen nicht nur einen Hauptkern, sondern noch Nebenkerne, die miteinander verschmelzen. Diesen Modus trifft man besonders bei den langen Röhrenknochen der Extremitäten. Erst verknöchert das Mittelstück (Diaphyse) und getrennt davon die Endstücke (Epiphysen) — beide sind auch im jugendlichen Alter noch zu unterscheiden, die Verschmelzung tritt erst später ein. — Benachbarte Knochen können sich ferner auf verschiedene Art zu einem Skelettstück vereinigen. Entweder sind die fertigen Knochen durch sehnige Bänder verbunden (Syndesmose) oder durch Knorpel (Synchondrose). Stoßen Knochen oft zackig vorspringend fest aneinander, so spricht man von Nahtverbindung (Sutura). Völlige knöcherne Verwachsung heißt Synostose.

Durch Bänder und Knorpelbrücken verbundene Skelettstücke sind mehr oder minder beweglich gegeneinander. Vorzügliche Beweglichkeit wird durch echte Gelenkbildung (Diarthrose) erzielt (Fig. 34).

Der Bau eines Gelenkes ist folgender: die beiden fraglichen Knochen (resp. Knorpelstücke) sind durch einen schmalen Spalt, die „Gelenkhöhle“, getrennt und um diese herum durch elastisches Bindegewebe verbunden („Gelenkkapsel“). Die aneinanderstoßenden Skelettstücke passen genau aufeinander („Gelenkkopf“ und -„grube“), sind sehr glatt und werden durch die „Gelenkschmiere“ auch

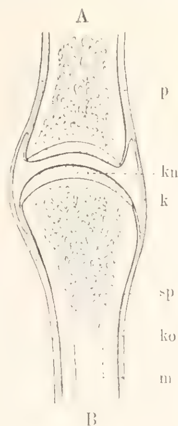


Fig. 34. Längsschnitt eines Wirbeltiergelenks. A und B die zwei aneinanderstoßenden Knochen, k Gelenkkapsel, kn Gelenkknorpel, ko feste, sp spongiöse Knochensubstanz, m Mark, p Knochenhaut (Periost). Nach Boas.

immer glatt erhalten. Handelt es sich um Knochenstücke, so findet man die „Gelenkflächen" fast immer mit einer dünnen Knorpellage („Gelenkknorpel") überzogen. Die festeren Stränge des Bindegewebes, die von einem Knochen zum anderen ziehen, bezeichnet man als Bänder (Ligamente).

1. Das Hautskelett. Es tritt fast ausnahmslos knöchern auf und stellt histologisch einen Teil des Integumentes, besonders des Coriums dar. Der Schmelz (Substantia adamantina) und das Horn (Keratin) ist eine Abscheidung oder Umwandlung der Epidermis. In fast allen Gruppen erreichen die Hautverknöcherungen einen besonderen Grad der Differenzierung.

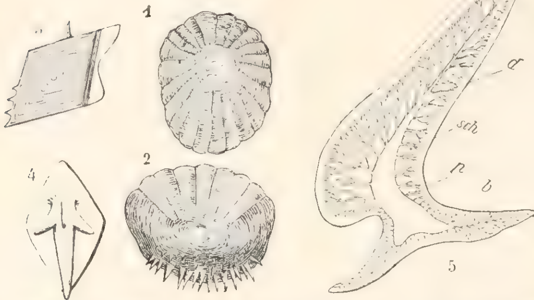


Fig. 35. Schuppen vom Hautpanzer der Fische. 1 Cycloidschuppe, 2 Ktenoidschuppe von Teleosteern, 3 Ganoidschuppe von Lepidosteus, 4 und 5 Plakoidschuppe von Haien, 5 dieselbe im Sagittalschliff, d Dentin, sch Schmelz, p Pulpahöhle, b Basalplatte. Nach R. Hertwig.

Genetisch haben sich manche dieser Stufen in Einklang bringen lassen (z. B. Fischschuppen und Verknöcherungen der Amphibienhaut), bei anderen ist dies nicht oder noch nicht gelungen.

a) Fische und Dipnoer. Die ursprünglichsten Bildungen sind die Placoidschuppen oder Placoidorgane der Selachier. Auf knöcherner Basalplatte (Fig. 35, 4, 5) sitzt ein aus Dentin (Substantia eburnea) bestehender hohler (Pulpahöhle) Zahn. Die Dentinbildner heißt man Odontoblasten. Die Spitze besteht aus Schmelz, auch bisweilen als Vitrodentin bezeichnet. Die Placoidorgane geben den stammesgeschichtlichen Ausgangspunkt für die echten Zähne, für Deckknochen am Schädel und andere Hautknochen.
Ein Teil der Ganoiden besitzt eigenartige rhombische Knochenplatten (Ganoinschuppen, Fig. 35, 3), die sich, wenn auch nicht direkt an die vorigen anschließen. Die Basalplatte ist knöchern (sogenanntes Isopedin) und mit Röhrchen durchsetzt; außen lagert eine glasharte Ganoinschicht auf. Die Störe haben neben nackten Hautstellen große Knochenschilder, aber ohne Ganoin. — Die Teleosteer schließen sich an vorige an. Es kommt ein der Basalplatte entsprechendes Gebilde zur Entwickelung. Abweichend ist die Lagerung der rundlich-ovalen, aus zwei Schichten (obere homogene Hyalodentinschicht, untere fibrilläre Faserschicht) bestehenden Schuppen in besonderen Taschen. Die Schuppenbildner heißen Scleroblasten. Der Form nach unterscheidet man besonders Cycloid- und Ktenoidschuppen (Fig. 35, 1, 2). Ganz merkwürdig ist das Hautskelett der Plectognathen, Lophobranchier und anderer; wie überhaupt der Hautpanzer vielfache Modifikationen aufweisen kann.

b) Amphibien. Nur wenige von den rezenten Formen sind gepanzert, so z. B. die Gymnophionen, welche ovale Schüppchen in Taschen liegend besitzen. Die † Stegocephalen waren stark gepanzert und es ist sicher, daß ihr Hautskelett eine Weiterbildung von dem der Fische bildete. Von Anuren besitzen nur wenige Vertreter (z. B. Ceratophrys dorsata) Knochenplättchen in der Haut.

c) Reptilien. Hier ist das Exoskelett bei fossilen und rezenten Formen zum Teil reich entwickelt. Einmal treten sehr harte, oft bedornte Hornplatten auf, die aber epidermalen Ursprungs sind, ferner Knochenschilder verschiedener Art im Corium, welche mit den Horngebilden in mehr oder minder enge Beziehungen treten. Man findet beispielsweise Knochenplatten entsprechend gelagert den Hornschildern bei Blindschleichen und Krokodilen. Letztere besitzen auf diese Art einen auf der Dorsalseite äußerst widerstandsfähigen Panzer. Ganz typisch ist das Hautskelett der Schildkröten. Es treten sowohl große Hornplatten auf (z. B. Carettschildkröte) als auch Knochenplatten, die rein mesodermalen Ursprungs sind (sogenannte Nuchal-, Marginal-, Pygal-

platten). Hierzu kommen noch Platten, die im Anschluß an Wirbel- und Rippenknorpel sich bildeten (Neural-, Costalplatten). Diese ganzen Hartteile vereinigen sich zu einem festen Panzer, dem dorsalen Caparax und dem ventralen Plastron (Fig. 36, A und B). Form und Anordnung der

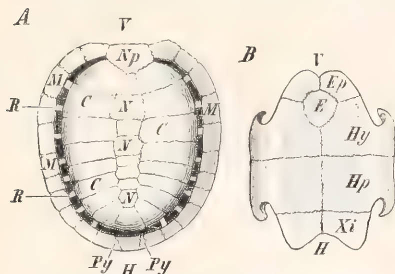


Fig. 36. A Caparax, B Plastron einer jungen Testudo graeca, C Costal-, M Marginal-, N Neural-, Np Nuchal-, Py Pygalplatten, E Ento-, Ep Epi-, Hp Hypo-, Hy Hyo-, Xi Xiphiplastron, V vorn, H hinten. R Rippen. Nach Wiedersheim.

Platten wechselt und es soll hier nicht näher darauf eingegangen werden.

Dermaler Herkunft sind auch die Bauchrippen bei Hatteria und manchen Krokodilen. Den Vögeln fehlen Hautverknöcherungen, sie besitzen aber an den Füßen Hornplatten.

d) Mammalia. Hier finden sich nur bei den Gürteltieren dermale Hautknochen in Form von vier- bis vieleckigen Platten. Auch hier treten sie mit Horngebilden der Epidermis in Beziehungen, obwohl sie sich in der Lagerung nur teilweise entsprechen. Auf dem Kopf, in der Schulter- und Beckengegend stoßen die Knochenplatten fester zusammen und geben entsprechend bezeichnete Schilder. Zwischen Schulter- und Beckenschild finden sich noch je nach der Art 3 bis 13 bewegliche Gürtel. Ein merkwürdiges Schuppenkleid haben die danach benannten Schuppentiere. Der Körper ist mit großen, dachziegelartig sich deckenden Hornplatten bedeckt.

Bei den † Glyptodon kam es zur Bildung eines schildkrötenähnlichen Panzers, indem alle Dermalknochen zu einem großen Rückenschild verschmolzen. Auch die †Zeuglodonten, Vorfahren der Wale, hatten einen Hautknochenpanzer. Die Gehörne und Hörner der Wiederkäuer gehören wenigstens topographisch zum Exoskelett, werden aber an anderer Stelle behandelt, ebenso die Huf- und Krallenbildungen.

2. Wirbelsäule und Chorda. Als Vorläufer der Wirbelsäule (Columna vertebralis) erscheint überall die Chorda dorsalis, auch „Achsenstab“ oder „Rückensaite“ genannt, embryonal bei allen Vertebraten auftretend. Die Chorda, vom inneren Keimblatt stammend, durchzieht als elastischer Stab den Körper und liegt zwischen Rückenmark und Darm. Der histologische Bau ist verschieden. Die großen saftreichen Chordazellen sind von einer zunächst eng anliegenden Schicht (primäre Chordascheide oder Elastica externa) umschlossen. Später vakuolisieren die zentralen Zellen, die peripheren ordnen sich epithelial (Chordaepithel) an und produzieren eine zweite sekundäre Schicht (Elastica interna oder sekundäre Chordascheide). In dem die Chorda umgebenden mesodermalen Gewebe (skelettogene Schicht) kommt es zur Ausbildung der Wirbel mit ihren Fortsätzen (Fig. 37, A—E).

Bei Selachiern und Dipnoern wird die primäre und sekundäre Scheide vom entstehenden Knorpelgewebe der oberen und unteren Wirbelbögen durchbrochen. Bei Knochenganoiden, Teleosteern, Amphibien und Amnioten entwickelt sich Knorpel nur außerhalb der primären Scheide (perichordal). In beiden Fällen wird die Chorda dorsal wie ventral im weiteren Wachstumsverlauf vom entstehenden massiven Wirbelkörper (Corpus vertebralis) umhüllt und eingeschnürt. Chordagewebe kann aber entweder zwischen den Wirbeln (intervertebral) oder in den Wirbeln (intravertebral) erhalten bleiben.

Die Wirbel sind durch elastische Bindegewebsstränge (Ligamenta intervertebralia) verbunden. Durch Fortsatz- und Gelenkflächenbildung kompliziert sich der Wirbelbau mehr und mehr. Am fertigen Wirbelkörper kann man im allgemeinen folgende Teile unterscheiden: a) den dorsalen, das Rückenmark (im Canalis spinalis) umschließenden Bogen (Neurapophysis) mit dem oberen Dornfortsatz (Processus spinosus superior); b) den ventralen Bogen (Haemapophysis), vielfach im Schwanzteil die großen Gefäße umschließend, mit dem unteren Dornfortsatz (Processus spinosus inferior); c) paarige Querfortsätze (Processus transversi oder Parapophysen), zum Ansatz der Rippen dienend; d) die Zygapophysen oder Processus articulares, die gelenkige Verbindung der Wirbel vermittelnd.

Die vorderen und hinteren Wirbelflächen können verschiedene Form haben. Sie sind a) bikonkav (amphicöle Wirbel), b) vorn konvex, hinten konkav (opisthocöle Wirbel), c) vorn konkav, hinten konvex (procöle Wirbel), d) sattelförmig an beiden Flächen, e) ganz flach mit knorpeligen Zwischenscheiben (Menisci).

Fig. 37. Schema der Entwickelung der Chordascheiden und der Wirbelsäule. A I. Stadium. nc Chordazellen, sh^1 primäre Chordascheide, skl mesodermales Gewebe; B II. Stadium (Cyclostomen, Knorpelganoiden), zentrale Chordazellen sind vakuolisiert, die peripheren epithelial neep geordnet, sh^2 sekundäre Scheide. Im mesodermalen Gewebe legen sich dorsale da und ventrale va Bögen an. C III. Stadium, Knorpel durchbricht die primäre Scheide und dringt in die sekundäre Scheide ein (Holocephalen, Selachier, Dipnoer). D Knorpel umwächst die Chorda außerhalb der Scheiden die allmählich verfallen, (Knochenganoiden, Teleoster, Amphibien, Amnioten). A bis D aus der Caudalregion, E späteres Stadium eines Rumpfwirbels; die Chorda nc stark rückgebildet; der Knorpel ist einheitlich zusammengewachsen und läßt den Wirbelkörper c, obere Bögen na, einen Dornfortsatz nsp, Querfortsätze trp und Gelenkfortsätze art erkennen. Nach Wiedersheim.

Die Wirbelanlage geschieht zunächst in zwei oberen und unteren Bogenpaaren. Das vordere Paar ist das craniale, das hintere das caudale. Bei niederen Fischen verschmelzen in jedem Muskelsegment (Metamer) die cranialen und caudalen Bögen, so entstehen die intrametameren Wirbel. Die übrigen Vertebraten haben intermetamere Wirbel, d. h. der craniale Bogen eines Metamers verschmilzt mit dem caudalen des vorhergehenden.

2a) Fische und Dipnoer. An der Wirbelsäule ist nur Rumpf- und Schwanzteil unterscheidbar. Im Schwanz schließen sich die Hämapophysen vielfach zum Hämalkanal zusammen. Amphioxus und Cyclostomen behalten die Chorda in vollem Umfange, bei letzteren kommt es nebenher zur Knorpelentwickelung. Knorpelganoiden, Holocephalen und Dipnoer haben schon typische obere und untere Bögen neben der Chorda, zum Teil mit Knorpeleinlagerung in die Chordascheide. Selachier, Knochenganoiden, Teleosteer zeigen neben der Chorda obere und untere Bögen sowie Wirbelkörper, doch können die Bögen zu Zwischen- oder Schaltstücken (Intercalaria) reduziert sein. Die Zahl der Wirbel ist variabel, z. B. Aal etwa 200, Haie bis etwa 400.

Das Ende der Schwanzwirbelsäule zeigt ein wechselndes Verhalten. Es kann Chorda und Rückenmark symmetrisch von der Schwanzflosse umhüllt sein (sogenannte Diphycerkie, z. B. Dipnoer) oder es biegen beide dorsal aus. Die Schwanzflosse ist im zweiten Falle ventral viel größer (Heterocerkie, z. B. Haie). Ist die Heterocerkie nur innerlich, äußerlich aber maskiert durch eine symmetrische Flosse, so spricht man von Homocerkie (Fig. 38, A—C). Das stielförmige Endstück der Wirbelsäule bezeichnet man als Urostyl, die ventral darunter liegenden besonders großen Stücke als Hypuralia.

2b) Amphibien. Die Wirbel dieser Gruppe sowie aller übrigen tetrapoden Vertebraten schließen sich mehr oder minder eng an die der Fische an und sind trotz mancher Abweichungen im ganzen Wirbeltierstamm als homologe Bildungen anzusprechen.

Bei fossilen und rezenten Amphibien bleiben nur geringe Chordareste dauernd erhalten. Die Wirbelsäule zeigt eine weiterschreitende Differenzierung in Hals-, Brust-, Lenden-, Kreuz- und Schwanzregion (Regio colli, thoracis, lumbalis, sacralis, caudalis), die auch ferner bei den übrigen Vierfüßlern anzutreffen ist. Die Regionen können sich, aber nur auf Kosten der benachbarten, vergrößern. Die Wirbelzahl variiert, Frösche haben nur 9, Blindwühlen etwa 270. — Die Wirbelkörper besitzen immer Neurapophysen; dagegen Hämapophysen nur die der Schwanzlurche. Dorn- und Querfortsätze, verschieden ausgebildet, sind vorhanden. Sehr stark sind die Querfortsätze bei Anuren am Sacralwirbel (nur einer); sie tragen das Becken und hier sind auch die Schwanzwirbel synostotisch zu einem langen Knochen (Os coccygis) verschmolzen. Amphicöle Wirbel haben Urodelen und

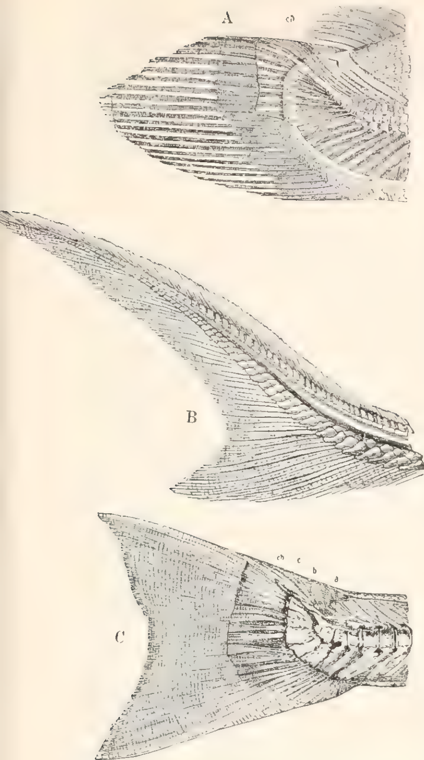


Fig. 38. A Diphycerke Flosse vom Polypterus, B heterocerke vom Stör, C homocerke von der Forelle. Nach R. Hertwig.

Gymnophionen; procöle die Anuren; opisthocöle einige Salamandrinen und Anuren. — Besonders modifiziert ist der erste Halswirbel (Atlas; Fig. 39). Vorn basal trägt er einen Fortsatz (Tuberculum interglenoidale), der die Beweglichkeit des Kopfes ermöglicht, lateral trägt der Atlas noch 2 Gelenkflächen für die 2 Condyli occipitales. Der Amphibienatlas entspricht nicht dem der Amniota.

2c) Reptilien. Die Wirbelsäule ist kräftig entwickelt. Die einzelnen Regionen sind gut unterscheidbar, außer bei den Schlangen und fußlosen Eidechsen (Amphisbänen), welche nur eine Rumpf- und Schwanzregion haben. Die Wirbel sind meist procöl. Die Chorda geht im Alter zugrunde außer bei den Ascalaboten, die auch amphicöle Wirbel besitzen. Auch Hatteria (Rhynchocephalen) hat noch diese Wirbelform, aber hier lagern sich faserknorpelige Bandscheiben (Intercentra) zwischen die Körper. Sacralwirbel sind zwei vorhanden mit kräftigen

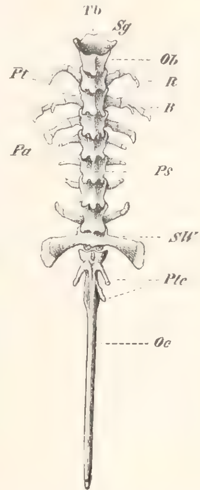


Fig. 39. Wirbelsäule von Discoglossus (Anura), Ob oberer Bogen, Pa Processus articularis, Tb Tuberculum interglenoidale, Sg seitliche Gelenkflächen des 1. Wirbels, Ps Processus spinosi, Pt Processus transversi, Ptc Processus transversi der Schwanzwirbelsäule mit dem Os coccygis Oc, SW Sacralwirbel. Nach Wiedersheim.

R = Rippen.

Processus transversi. Wirbelzahl variierend, Schlangen bis 400. — Besonders modifiziert sind die 2 ersten Halswirbel. Der erste ist der Atlas, dessen Körper nicht mit den Bögen verschmilzt, sondern mit dem Körper des zweiten Wirbels, dem Epistropheus (oder Dreher) zum Dens epistrophei oder Processus odontoideus (vgl. Fig. 40).

Krokodile und Rhynchocephalen haben vor dem Atlas noch einen sogenannten Proatlas, der als Rest eines Wirbels zwischen Atlas und Hinterhaupt angesehen wird.

2d) Vögel. Ihre Wirbelsäule, im Bau an die der Reptilien anschließend, ist gut ausgebildet. Die †Vögel (Archäopteryx) hatten amphicöle Wirbel; die rezenten Formen haben am Wirbelkörper doppelt gekrümmte Gelenkflächen, sogenannte Sattelgelenke. Körper und Bögen sind überall massiv verschmolzen. Der Atlas, dessen Körper mit dem Epistropheus zum Dens epistrophei verwächst, ist ein massiver Ring mit einer Gelenkfläche für den einzigen (wie auch bei Reptilien) Condylus occipitalis. Vielfach verknöchert am 2. Halswirbel das den Dens epistrophei fixierende und gegen den Neuralkanal abschließende Querband (Fig. 40, A—C).

Wenig beweglich sind die Rumpfwirbel und in noch geringerem Grade die Beckenwirbel. Embryonal sind 2 primäre Sacralwirbel vorhanden, im weiteren Wachstumsverlauf werden zum Sacrum (Kreuzbein) lumbale, thoracale und caudale Wirbel mit eingeschmolzen zu einem starren Gebilde. Der Caudalteil hat einen rudimentären Charakter. Die Wirbel verschmelzen unter Verlust der Quer- und Dornfortsätze zum sogenannten Pygostyl oder Urostyl. Nur manche Ratiten behalten dauernd die Wirbelgliederung bis zur Schwanzspitze wie sie z. B. auch Archäopteryx zeigte.

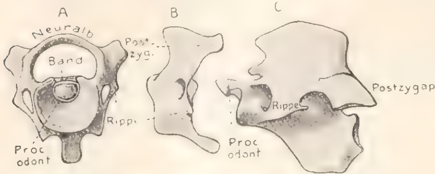


Fig. 40. Die zwei ersten Halswirbel vom Strauß (Struthio camelus). A Atlas und Zahn des Epistropheus von vorn, B Atlas von links, C Epistropheus von links. Unter dem Processus odont. die Gelenkfläche für den unpaaren Condylus occipitalis. Nach Bütschli.

2e) Säuger. Die nur embryonal auftretende Chorda wird später ganz verdrängt; umgeformte Reste erhalten sich nach der Ansicht mancher Autoren in den Intervertebralscheiben. Die knorpelig angelegte Wirbelsäule verknöchert später völlig, zunächst die Körper, dann die Bögen. Typisch für Vertebraten ist das Vorhandensein von besonderen Ossifikationszentren für die flachen Wirbelenden, die sogenannten Epiphysenscheiben. Echte Gelenke findet man zwischen dem Atlas und den 2 Condyli occipitales einerseits und dem Atlas und Epistropheus andererseits (Fig. 41). Untereinander sind die Wirbel durch elastische, aber feste Bänder verbunden. — Der Hals-(Cervical)region fehlen in der Regel Rippen

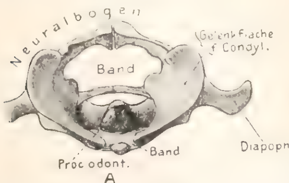


Fig. 41. Atlas von Thylacinus cynocephalus von vorn. Di Diapophysen. 2 Gelenkflächen rechts und links vom Processus odontoideus oder Dens epistrophei. Aus Bütschli.

und fast stets sind 7 Wirbel vorhanden (bei Walen zu einem Knochen verschmolzen). — In der Brustregion tragen die Wirbel bewegliche Rippen und dementsprechende obere und untere Querfortsätze (Dia- und Anapophysen). Sehr stark sind die Processus spinosi an Hals- und Brustwirbeln bei geweihtragenden Säugern. Ein starkes elastisches Band, das Nackenband (Ligamentum nuchae), ist daran einerseits, am Schädel andererseits befestigt. Die Zahl der Brustwirbel ist meist 13; sinkt aber bis 9 oder steigt bis 24. Die Lumbalregion hat keine Rippen und ihre Wirbelzahl ist meist 6 oder 7, aber wie die der Brustregion wechselseitigen Schwankungen unterworfen, d. h. je mehr thoracale Wirbel, desto weniger lumbale Wirbel und umgekehrt.

In der Beckenregion ist das Darmbein (Ileum) verbunden mit den Sacralwirbeln (primär 2), die selbst zum Os sacrum verschmelzen. Auch können Schwanzwirbel synostotisch mit dem Kreuzbein verschmelzen. Sehr variabel ist die Caudalregion, die Zahl der Glieder schwankt von 3 bis 49. Hat der Schwanz besondere Funktionen (Klammeraffen, Känguruh, Biber, so sind die Caudalwirbel gut entwickelt.

3. Rippen und Brustbein. Die morphologische Bedeutung der Rippen (Costae) ist noch strittig. Ein Teil der Forscher hält sie für Abgliederungen der unteren, nicht geschlossenen Wirbelbögen, ein anderer Teil glaubt, es seien selbständige, in den Muskelsepten entstandene Skelettbildungen, welche erst sekundär mit den Wirbeln resp. deren Fortsätzen (Dia- und Parapophysis) in Verbindung treten. Vielleicht sind beide Wege eingeschlagen worden bei der Ausbildung. Die Rippen, knorpelig oder knöchern, massiv oder spongiös, umschließen spangenartig die Brust- resp. die Bauchhöhle. Durchgehende Homologie der Rippen in den einzelnen Klassen besteht aber nicht. Bei den Amnioten sind die Rippen meist durch Knorpel oder durch Knochen (Sternocostalknorpel resp. -knochen) mit dem Brustbein (Sternum) verbunden, welch letzteres aus der Verschmelzung der ventralen Rippenenden hervorgeht. Echte Rippen (Costae verae) sind direkt, falsche Rippen (Costae falsae) sind durch Knorpel, freie Rippen (Costae fluctuantes) sind gar nicht mit dem Sternum verbunden.

3a) Fische und Dipnoer. Es kommen vor: a) Obere (Lateral-) Rippen, sie verlaufen horizontal und liegen im Septum, das die dorsale und ventrale Muskulatur

trennt; b) untere (Pleural-) Rippen, sie liegen auch in Septen, aber sehr eng an der Bauchhöhle und verlaufen vertikal. — Selachier haben nur obere Rippen. Einige Knochenganoiden (Polypterus) und manche Teleosteer (Clupeiden, Salmoniden) besitzen beide Arten. Die Dipnoer, die meisten Teleosteer haben untere Rippen. Auch können sie ganz fehlen (z. B. Rochen) (Fig. 42).

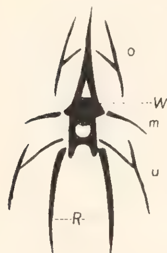
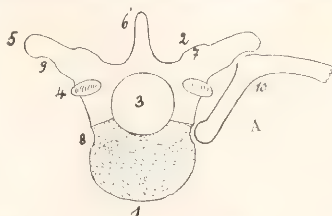


Fig. 42. Schematischer Querschnitt durch die Caudalregion bei einem Teleosteer (Maifisch Alosa alosa), W Wirbel, O obere, m mittlere, u untere Gräte, R Pleuralrippen. Nach Bütschli.

Fleischgräten. In den Septen der Muskeln treten noch andere knöcherne Gebilde auf die sogenannten Gräten. Sie sind einfach stab- oder „Y"förmig. Meist findet man drei übereinanderliegende Reihen so daß man von oberer, mittlerer und unterer Gräte spricht.

3b) Tetrapode Wirbeltiere. Ihre Rippen entsprechen den oberen Fischrippen. Bei den Amphibien besitzen Urodelen und Gymnophionen (Blindwühlen) nur schwache Rippen, die nicht bis zum Bauch reichen. Den Fröschen fehlen Rippen oder sie sind schwach angedeutet. — Kräftige, proximal gegabelte Rippen haben die Amniota; sie reichen meist bis zum Sternum. Der dorsale Ast (Tuberculum) sitzt an der Diapophysis, der ventrale (Capitulum) an der Parapophysis. Halsrippen findet man bei Reptilien und Vögeln, selten bei Säugern. In letzterer Gruppe sind diese Rippen meist mit dem Wirbelkörper und dessen Fortsätzen unter Bildung eines Foramen transversarium verwachsen. — Ist das Sternum gut ausgebildet, dann sind es auch meist die zugehörigen Rippen, an welchen man den knöchernen Vertebralteil und den knorpeligen Sternalteil unterscheidet. Beide stoßen in spitzem Winkel zusammen, dessen Scheitel caudalwärts liegt. Die Sauropsidenrippen haben am Vertebralteil einen Hakenfortsatz (Processus uncinatus), der sich auf die jeweils folgende Rippe legt zur Erhöhung der Gesamtfestigkeit des Brustkastens (Fig. 43, A und B).

Brustbein (Sternum). Es tritt in innige Beziehungen zum Schultergürtel und den Rippen und bildet mit letzteren zusammen den Brustkorb. Das Sternum entsteht bei den Amphibien (wo es zum ersten Male auftritt) durch Verschmelzung paariger Knorpelplatten (Urodelen, Anuren) und ist



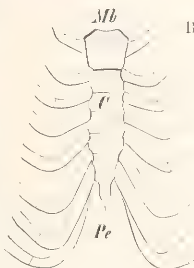


Fig. 43. A Schema eines Brustwirbels mit Rippenansatz eines Säugers; 1 Wirbelkörper, 2 Neuralbogen, 3 Wirbelloch (Neuralkanal) 4 Processus articularis, 5 Processus transversus (Diapophysis), 6 Processus spinosus, 7 Processus mamillaris, 8 Gelenkfläche für das Capitulum, 9 für das Tuberculum der Rippe 10. Nach Weber. B Brustbein vom Menschen, Mb Manubrium sterni, C Corpus sterni, Pe Processus ensiformis. Nach Wiedersheim.

recht verschieden gestaltet. Cranial liegt vor dem Sternum noch ein kleines anschließendes Knorpelstück, das Omosternum. — Bei den Amnioten wird das Brustbein durch das Zusammenschmelzen der knorpeligen ventralen Rippenenden gebildet, die jederseits zur Sternalleiste sich vereinigen. Diese wiederum legen sich parallel aneinander und bilden durch Verknöcherung das Sternum selbst. Manchen Reptilien fehlt ein Brustbein (z. B. Schlangen), bei anderen wiederum (z. B. Krokodile) ist noch ein sogenanntes Bauchsternum (Abdominal- oder Parasternum) entwickelt. Seitlich setzen sich daran Rippen (Abdominal- oder Bauchrippen) an, die wie das Parasternum aber auf Hautverknöcherungen zurückzuführen sind, welche in die Tiefe sanken. Oralwärts vor dem Sternum liegt das Episternum (ebenfalls ein Hautknochen), welches mit dem Schultergürtel in Verbindung tritt. Vögeln fehlt letztgenannter Knochen, aber dafür ist sehr gut das Sternum ausgebildet. Median erhebt sich bei den Carinaten auf demselben ein mächtiger Kamm (Crista oder Carina

sterni) zum Ansatz der Flugmuskeln. — Bei den Säugern nehmen die Monotremen eine gesonderte Stellung ein in bezug auf den Sternalapparat. Gewöhnlich findet man sonst in dieser Gruppe das massive Brustbein dreiteilig: a) den cranialen Teil (Manubrium), b) den Sternalkörper (Corpus sterni), c) den caudalen Schwertfortsatz (Xiphisternum oder Processus ensiformis s. xiphoides) (Fig. 43, B).

4. Schultergürtel. Er ist der Träger der paarigen Vorderextremitäten und erreicht besonders bei landlebenden Vierfüßlern ein hohes Maß der Differenzierung in den einzelnen Gruppen. Er wird knorpelig paarig angelegt, aber durch Ersatz- und Deckknochen teilweise oder ganz ersetzt. Dem Amphioxus und den Cyclostomen fehlt dieser Gürtel.

4a) Fische. Bei Selachiern und Holocephalen besteht der Schultergürtel aus 2 Knorpelbogen, die dicht hinter dem Kiemenapparat liegen und median verwachsen. Etwa in der Mitte des Seitenteils wölbt sich ein Gelenkhöcker hervor, der in eine entsprechende Pfanne an der Flosse paßt. Der dorsal von der Gelenkstelle gelegene Teil wird als Scapula (Schulterblatt), der ventrale Abschnitt als Coracoid (Rabenbein) bezeichnet. Die Dipnoer schließen sich im Bau dieses Gürtels an vorige Gruppen an. Zu dem primären Bogen (primärer Schultergürtel) kommen noch Deck- und Ersatzknochen (sekundärer Gürtel), so daß ersterer mehr und mehr verdrängt wird. Bei Ceratodus besteht der Gürtel aus folgenden Stücken: dorsal vom Gelenkhöcker der Flosse liegt die Scapula (auch Cleithrum hier genannt), daran sind die Supraclavicularia befestigt, die wiederum am Schädel aufgehängt sind; eine Art der Befestigung, die auch bei anderen Fischen wiederkehrt; ventral liegt der coracoidale Teil, auch Claviculare (Schlüsselbein) hier genannt. Bei den Knochenganoiden und Teleosteern ist der primäre Gürtel nur embryonal ausgebildet und wird durch den sekundären völlig ersetzt (Fig. 44).

Wir finden in diesen letzten Gruppen ein großes bogenförmiges Claviculare oder Clavicula (Schlüsselbein), ventral ein Coracoid, dorsal eine Scapula und Supraclavicularia (eventuell noch Postclavicularia), doch kommen vielerlei Modifikationen innerhalb der Teleosteergruppe vor.

4b) Amphibien. Ihr Schultergürtel ist wie der aller anderen Vierfüßler nicht unmittelbar auf den der Fische zurückzuführen. Die Grundzüge der Gestaltung des Amphibienschultergürtels kehrt aber bei allen von ihnen herzuleitenden Gruppen wieder. Wir finden folgendes Grundschema. Dorsal die Scapula mit der meist knorpeligen Suprascapula. Mehr ventral das oralwärts liegende Pro- (auch Prä-) Coracoid und das caudal gelagerte Coracoid. Beide letzteren Teile stoßen median zusammen und

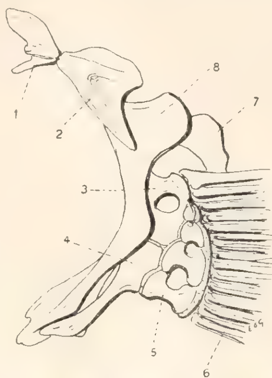


Fig. 44. Linker Schultergürtel von Pterois volitans (Teleosteer). 1 Posttemporale, 2 Supraclaviculare, 3 Scapula, 4 Coracoid, 5 Radialia, als Stützen der Flossenstrahlen 6, Postclavicula 7, Clavicula 8. Nach Goodrich.

legen sich ans Sternum an. Dem knorpeligen Procoracoid lagert sich ein Deckknochen auf, der ersteres ganz oder teilweise verdrängen kann, es ist die Clavicula, welche von der Scapula zur Medianebene zieht und in dieser zusammenstößt (Fig. 45). Zwischen Clavicula

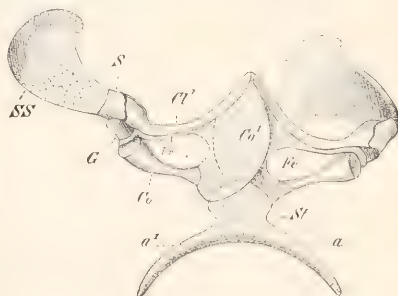


Fig. 45. Schultergürtel von Bombinator igneus (Anura): Pr Procoracoid, Cl[1] Clavicula, Co Coracoid, Co[1] Epicoracoid, sich jederseits in den Sternalrand einfalzend, Fe Fenster, G Gelenkpfanne für den Oberarm, S Scapula, SS Suprascapula, St Sternum mit seitlichen Fortsätzen a, a[1]. Knorpel punktiert. Aus Wiedersheim.

und Coracoid kommt es vielfach zur Fensterbildung. Dieser Grundtyp des Baues erfährt natürlich Abänderungen in den verschiedenen Gruppen. So haben die mehr wasserbewohnenden Urodelen einen überwiegend knorpeligen Gürtel. Gewöhnlich ist nur Scapula und Coracoid verknöchert. Kräftig ist der Gürtel bei den Anuren entwickelt. Hier stoßen aber Clavicula resp. Procoracoid und Coracoid nicht direkt ans Sternum, sondern an das sogenannte Epicoracoid. Vor der Symphyse der Claviculae liegt bei den meisten Anuren noch ein Sternalfortsatz, das Epi- auch Omo- oder Prosternum.

4c) Reptilien. Am nächsten schließen sich die Saurier und Hatteria an die Amphibien an. Wohl ist noch ein primärer und sekundärer Gürtel unterscheidbar, aber die Abänderungen in den verschiedenen Gruppen machen eine einheitliche Deutung der verschiedenen Skelettstücke noch unsicher. Hervorzuheben ist die Fensterbildung in Coracoid und Scapula bei den Sauriern. Den Krokodilen fehlt die Clavicula. Ein typisches Procoracoid ist nur bei Schildkröten entwickelt, das mit der Scapula zu einem Knochen verwächst. Zusammenhänge des Gürtels finden sich hier auch mit dem Hautpanzer (Epi- und Entoplastron) und mit dem ersten Brustwirbel, an welchem er mittels eines Ligamentes mit befestigt ist. Das Epiplastron ersetzt vielleicht (?) die Clavicula, das Entoplastron das Episternum. — Reptilien mit rückgebildeten Extremitäten fehlt der Gürtel ganz oder teilweise (z. B Amphisbänen und Schlangen) (Fig. 46).

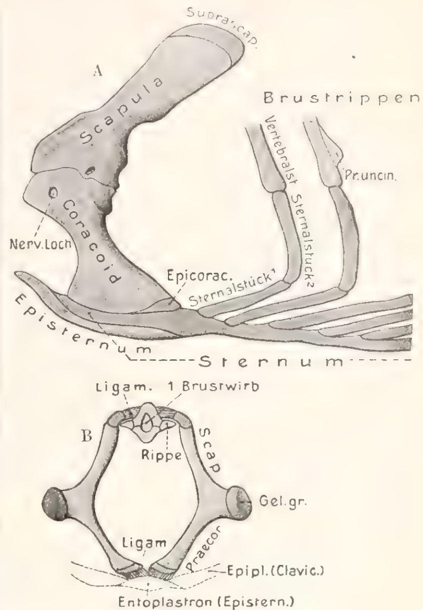


Fig. 46. Schultergürtel A von Alligator mississippiensis mit den ersten Brustrippen. Von links, Knorpel dunkel; B von Chelone viridis. Von vorn. Nach Bütschli.

4d) Vögel. Der Gürtel ist völlig verknöchert. Typisch sind die drei Knochen Scapula, Coracoid und Clavicula. — Die Scapula ist lang säbelförmig und bei den Carinaten fast rechtwinkelig zum Coracoid gestellt. Beide bilden die Gelenkpfanne. Ueber das Gelenk ragt ein Stück des Coracoids hinaus, der sogenannte Acrocoracoidfortsatz und an Stelle des Procoracoids findet man nur (besonders bei Raubvögeln) einen Processus coracoideus. Das Coracoid sitzt breit eingelenkt dem Sternum auf, während die median verwachsenen spangenförmigen Claviculae (sogenannte Furcula, Gabelbein) dieses meist nicht erreichen, sondern mittels eines Ligaments verbunden sind.

Bei den Ratiten ist Scapula und Coracoid fest verwachsen und die Clavicula verkümmert. Auch Papageien haben rudimentäre Claviculae (Fig. 47).

4e) Säuger. Einen primitiven Zustand nimmt der Schultergürtel der Monotremen ein, er erinnert noch vielfach an den der Saurier. Sie besitzen noch ein wohlentwickeltes Coracoid, das sich ans Sternum anlegt. Auch ein Episternum, zum Teil von den Schlüsselbeinen überdeckt, ist vorhanden. — Bei allen übrigen Säugern ist das Coracoid reduziert bis auf einen kurzen Fortsatz an der Scapula, dem sogenannten Processus coracoideus oder Rabenschnabelfortsatz. Das Schulterblatt ist sehr breit (Δförmig) und kräftig entwickelt.

Auf der Außenfläche erhebt sich ein Kamm (Spina oder Crista scapulae), der nach der Gelenkpfanne zu, diese überragend, in einen freien Fortsatz (das Acromion oder die Schulterhöhe) ausläuft. Die Claviculae sind meist gut ausgebildet und verbinden das Acromion mit dem Sternum. Der Processus coracoideus erreicht das Sternum nie mehr. Säuger, die die vorderen Extremitäten sehr frei bewegen (z. B. Chiroptera, Primates), haben eine sehr kräftige Clavicula. Huftieren, Walen und Raubtieren fehlt sie zum Teil (Fig. 48).

5. Beckengürtel. Er dient als Aufhänge- und Stützapparat für die Hinterextremitäten und entspricht so dem Schultergürtel. Wäh-

rend aber dieser nicht mit der Wirbelsäule fest verbunden ist, verwächst der Beckengürtel resp. bestimmte Teile desselben fest mit den Sacralwirbeln resp. deren Fortsätzen. Diese Querfortsätze verknöchern für sich, nicht vom Wirbel aus, sie sind daher wohl als Rippen anzusehen. Der Beckengürtel

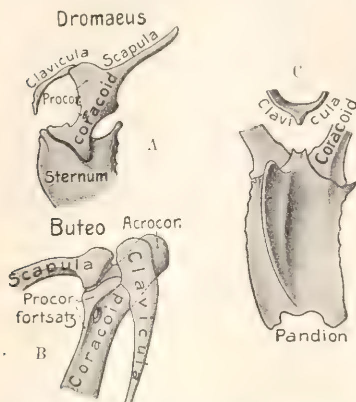


Fig. 47. Schultergürtel von Vögeln. A Dromaeus. Links von außen, B Buteo. Links von innen, C Sternum von Pandion. Von links ventral auf dem Sternum die mächtige Crista sterni. Nach Bütschli.

der Amphibien und Amnioten (diese 2 Gruppen kommen hierbei nur in Frage) hängt somit eigentlich an Rippen.

5a) Fische und Dipnoer. Hier ist der Gürtel noch sehr einfach gestaltet und nicht mit der Wirbelsäule verbunden. Bei vielen Formen fehlt er ganz, die Skelettstücke, die man dafür angesehen hat, sind die Basalstücke (Basipterygium) der Flossen. Bei den Selachiern ist das Becken eine unpaare Knorpelspange zwischen den Basipterygia der Flossen, die sich davon abgegliedert haben. Sie hat einige Fortsätze, die mit besonderem Namen benannt werden und entspricht im großen und ganzen dem Ischiopubis der höheren Formen. Bei den Dipnoern ist eine Beckenplatte vorhanden, die in verschiedene Fortsätze ausläuft. Nach vorn in den unpaaren Processus epipubicus; seitlich in den paarigen Processus praepubicus und einen Gelenkfortsatz für die Hinterextremitäten. Am Hinterrand springt ein unpaarer Processus hypoischiadicus hervor mit einer starken Muskelleiste (Fig. 49).

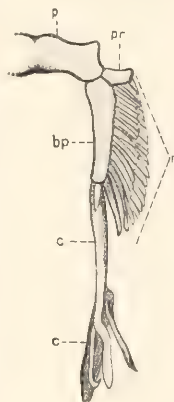


Fig. 49. Dorsalansicht des Beckens, der Flossen und des Copulationsapparates vom männlichen Acanthias vulgaris. p Beckenplatte (Ischiopubis), pr Propterygium, bp Basipterigyum, r Radien der Flossen, c Copulationsapparat mit seinen verschiedenen Teilen, umgewandelten Radien. Nach Goodrich.

5b) Amphibien. Der Gürtel zeigt, obwohl er sich an den der Dipnoer anschließt, Verhältnisse, wie sie sich dann bei allen Tetrapoden finden. Die dorsale Gürtelregion (iliacale) schließt sich an die Sacralwirbel fest an, was für die Fortbewegung von Bedeutung ist. Bei den Urodelen finden wir einen dorsalen Ast (das Ileum oder Darmbein) und einen ventralen (Ischiopubis oder Sitzschambein). An der Grenze beider liegt das Acetabulum oder die Gelenkpfanne für den Femurkopf. In der Mittellinie sind die ventralen Aeste verwachsen (Symphyse). Durchbohrt ist die Beckenplatte durch den Nervus obturatorius, (Foramen obturatorium).

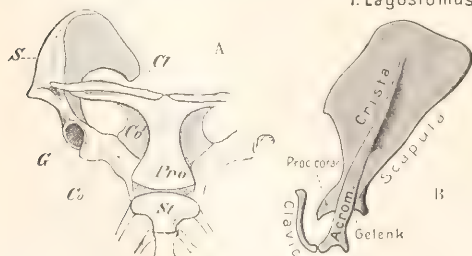


Fig. 48. A Schultergürtel vom Schnabeltier (Monotremata). Cl Clavicula, Co Coracoid, Co¹ Epicoracoid, G Gelenkpfanne, Pro Prosternum, S Scapula, St Sternum mit ansetzenden Rippen; B von Lagostomus (Nager). Von außen gesehen. A nach Wiedersheim, B nach Bütschli.

Median oral setzt sich an die Beckenplatte der Processus = Cartilago ysiloides an, auch als Epipubis bezeichnet, entspricht aber nicht dem Epipubis der Fische. Eine weitere Differenzierung erfährt der Gürtel nun dadurch, daß sich aus der einheitlichen Platte eine oral gelegene Pars pubica und eine caudal gelegene Pars ischiadiaca herausbildet. Aus ersterem wird das Os pubis (Schambein), aus letzterem das Os ischii (Sitzbein). Bei den fossilen Stegocephalen ist die völlige Dreiteilung des Beckens in den dorsalen Ast (Ileum) und 2 ventrale (Ischium und Pubicum) schon durchgeführt. — Die Anuren zeigen infolge ihrer hüpfenden Fortbewegung Besonderheiten im Becken. Die Darmbeine sind sehr lang. Die Beckenplatte ist seitlich sehr zusammengedrückt und ohne Foramen obturatorium. Die Schambeine verknöchern nicht. Das Acetabulum ist weit ans Ende des Körpers verlegt. — Den Gymnophionen ohne Extremitäten fehlt der Beckengürtel völlig (Fig. 50).

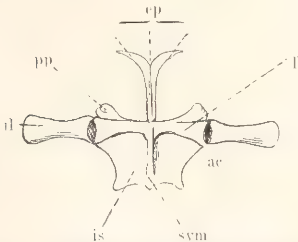


Fig. 50. Becken von Salamandra maculosa (Amphibia). Ventralansicht. ac Acetabulum, ep Epibubis (hier gegabelt), il Ileum, Pars ischiadica (is) und Pars pubica (p) der Beckenplatte (Ischiopubis), pp Processus praepubicus entsprechende Auswüchse, sym Symphyse. Aus Schimkewitsch.

5c) Reptilien. Ihr Becken zeigt eine direkte Weiterbildung des vorigen. Einmal legen sich die Darmbeine fest den Sacralwirbeln an, ferner rücken Scham- und Sitzbeine weit auseinander, zwischen sich das Foramen puboischiadicum lassend. Alle Teile sind kräftig verknöchert und gut herausdifferenziert. Die Rhynchocephala (Hatteria) leiten zu den übrigen Reptilien hinüber. — Wir finden Ileum, Ischium und Pubis, die zusammen die Pfanne bilden. Außerdem finden wir ein Epipubis und Präpubis, sowie in der Verlängerung der Symphyse von Sitz- und Schambein einen Processus hypoischiadicus, auch Os cloacae genannt. An die geschilderten Verhältnisse bei Hatteria schließen sich die Chelonier an, nur fällt hier der Canalis obturatorius mit dem Foramen puboischiadicum zusammen und dieses große Fenster wird meist als Foramen obturatum bezeichnet. Ob es eine Erweiterung des Nervenlochs ist oder wie die Verhältnisse liegen, ist noch fraglich. — Bei den Krokodilen ist das Ileum groß und liegt den 2 Sacralwirbeln breit an. Das Ischium entwickelt nach vorn einen kräftigen Fortsatz (Processus acetabularis ischii), der sich am Aufbau (ventral) der hier durchlochten Gelenkpfanne beteiligt. Ein Knorpelstück (Cartilago acetabularis) schiebt sich noch dazwischen und so wird das Schambein von der Pfannenbildung ausgeschlossen (Fig. 51, A). Die Sitzbeine sind durch eine Symphyse, die Schambeine durch eine bis zu den Bauchrippen reichende Membran verbunden. Das Foramen obturatum ist sehr groß. Schlangen fehlt dieser Gürtel.

Bei †Reptilien, †Dinosauriern, besonders †Theromorphen, findet man Verhältnisse, die zu den rezenten Vögeln hinleiten. Einmal werden 4 und mehr Wirbel einbezogen zum mächtigen Darmbein. Die Sitzbeine verlängern sich und sind nach hinten gerichtet. Die Schambeine gabeln sich, ein Ast (Postpubis) liegt parallel zum Sitzbein und ein anderer nach vorn (Präpubis) (Fig. 51, B).

5d) Vögel. Nach Obengesagtem ist der Bau des Vogelbeckens leicht verständlich. Die Darmbeine sind sehr ausgedehnt in einen prä- und postacetabularen Teil und ziehen noch mehr Wirbel (11 bis 18) in ihr Bereich (beim Archäopteryx 6). Scham- und Sitzbeine bilden gewöhnlich keine Symphysen und laufen caudal parallel, eventuell verwachsen sie unter Fensterbildung. Das Acetabulum ist gelocht und hat am Vorderrand vielfach einen Fortsatz die Spina iliaca oder den Processus pectinatus (Fig. 51, C).

5e) Säuger. Bei ihnen liegen, anschließend an Sauropsiden, die Darmbeine prä-, die Sitzbeine postacetabular. Die einzelnen Gürtelteile sind embryonal noch durch Knorpel getrennt, verwachsen aber später zu einem einzigen Knochen, dem massiven Os coxae (Hüftbein). Die Schambeine kommen am spätesten zur Verwachsung und beteiligen sich auch bei den meisten Säugern nicht mehr am Aufbau der Pfanne. Ihre Stelle nimmt das Os acetabuli ein, welches später mit einem der drei großen Knochen verschmilzt. Das Darmbein verbindet sich mit einer verschieden großen Zahl von Wirbeln. Zur doppelten Symphysenbildung zwischen den gegenseitigen Scham- und Sitzbeinen kommt es nur bei niederen Formen; die höheren, besonders die Primaten, haben nur eine Schambeinfuge. Das Foramen obturatum ist völlig von Knochen (Pubicum und Ischium) umgeben. Bei

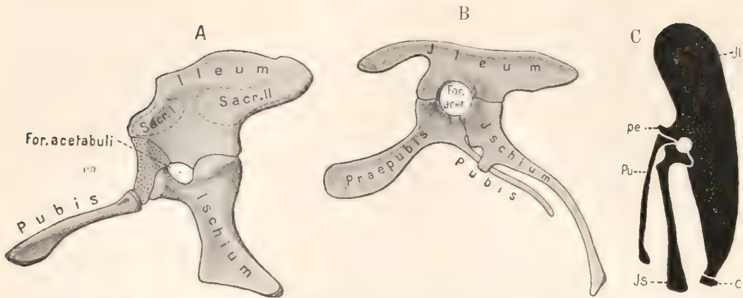


Fig. 51. Becken A von Alligator mississippiensis Von links. ca Cartilago acetabularis; die Ansatzstellen der Sacralrippen (Sacr I II) punktiert; B von Iguanodon. Von links. Pubis = Postbupis; C Becken eines Vogels (Casuarius juv.), Il Ileum, pe Processus pectinatus, Pu Pubis, Is Ischium, c Caudalwirbel. Nach Bütschli.

Monotremen finden wir auch noch das Acetabularloch der Sauropsiden wieder. Erwähnung bedürfen noch die Beutelknochen (Ossa marsupialia) der Beuteltiere (Marsupialia). Sie entspringen den Schambeinen, ragen nach vorn, liegen in der Bauchhaut und dienen zum Muskelansatz. Sie gehen aus Symphysenknorpel hervor, nicht aus Verknöcherungen der Sehnen, wie man früher annahm (Fig. 52).

6. Skelett der Gliedmaßen. Allgemeines. Die Skeletteile der Gliedmaßen, der paarigen wie unpaaren, sind knöchern bei den höheren Gruppen, knorpelig bei niederen, doch werden sie auch bei ersteren knorpelig präformiert und verknöchern erst später. — Selachier und Dipnoer zeigen in ihren Extremitäten noch eine besondere Stützsubstanz außer Knorpel und Knochen, es sind die sogenannten Elastoidin- oder Hornfäden. Die vorderen Extremitäten sind am Schulter-, die hinteren Extremitäten am Beckengürtel aufgehängt oder sie erhalten dadurch eine feste Stütze. Das Gliedmaßenskelett rechnet man von der Gelenkstelle an dem entsprechenden Gürtel ab, d. h. bei der vorderen Extremität vom Acetabulum humeri am Schultergürtel, bei der hinteren Extremität vom Acetabulum femoris am Beckengürtel. Typisch für das Extremitätenskelett ist die vielfache Gelenkbildung (Kugel- und Scharniergelenke), wodurch eine vielfache Hebelwirkung und große Beweglichkeit erzielt wird.

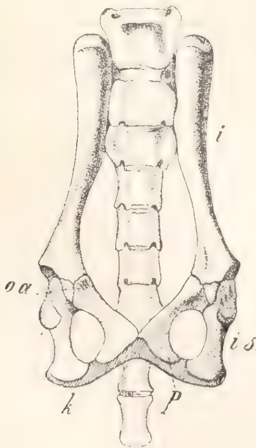


Fig. 52. Becken von Galeopithecus volans juv. Ventral; i Ileum, p Pubis, i.s. Ischium, oa Os acetabuli, k Knorpel. Nach Weber.

Besonders die großen Extremitätenknochen (Femur, Humerus usw.) sind als Röhrenknochen ausgebildet und, außer bei den Vögeln, mit Mark erfüllt.

A. Skelett der unpaaren Gliedmaßen.

Bei allen niederen schwimmenden Vertebraten vom Amphioxus bis zu den Dipnoern findet man in der Mediane eine über Rücken und Schwanzspitze bis zum After laufende Hautfalte (Flossensaum) in größerer oder geringerer Ausdehnung. Bei Amphioxus, Cyclostomen und manchen Fischen ist dieser Saum noch einheitlich. Meist aber wird er stellenweise rückgebildet und es differenzieren sich Flossen mit knorpeligen oder knöchernen Skeletteilen im Corium heraus, es sind dies: Rücken- (Pinna dorsalis), Schwanz- (Pinna caudalis) und Afterflosse (Pinna analis). Amphioxus hat noch kein Flossenskelett,

aber bereits bei Cyclostomen treten knorpelige Flossenträger (Radien) auf, die proximal den Neuralbögen aufsitzen und distal sich dichotom verzweigen. Den Haien kommen diese Flossenträger gleichfalls zu (oft mehrgliederig) und sitzen den Dornfortsätzen an. Hier reichen sie aber meist nur in die Flossenbasis hinein und werden peripher durch Horn- oder Elastoidinfäden ersetzt. Aehnliche Verhältnisse zeigen die Dipnoer (Fig. 53, A und B).

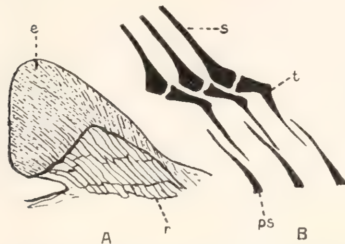


Fig. 53. Skelett der Rückenflossen, A von einem Hai (Ginglymostoma), e Elastoidinfäden, r Flossenträger oder Radien; B vom Dorsch, ps Processus spinosi, t Flossenträger, s Flossenstrahlen. A nach Goodrich, B nach Bütschli.

B. Skelett der paarigen Gliedmaßen.

Allen Wirbeltieren von den Fischen an aufwärts kommen 2 Paar Extremitäten zu. Findet man Ausnahmen, so handelt es sich um sekundäre Rückbildungen (z. B. Wale). Bei den Fischen sind paarige vielstrahlige Flossen vorhanden. Ein Paar Brust- (Pinna pectoralis) und Bauchflossen (Pinna ventralis). Die flossenförmigen Extremitäten bezeichnet man als Ichthyopterygium. Die paarigen Flossen sind den vorderen und hinteren Gliedmaßen der übrigen Wirbeltiere homolog. Die Glieder der Landformen sind überwiegend fünfzehig (Pentadactyl), man bezeichnet sie als Chiropterygium. Beim Uebergang vom Wasser- zum Landleben vollzieht sich die Umwandlung, d. h. aus dem Ichthyopterygium wird das Chiropterygium. Wie sie vor sich gegangen, ist Gegenstand der Forschung, noch nicht sicher und bildet einen Teil des großen Problems, das man als Gliedmaßentheorie bezeichnet.

Gliedmaßentheorie. Sie ist mit dem Studium der Extremitäten eng verknüpft. Besonders zwei Fragen sind zu lösen: a) die nach der Herkunft und dem morphologischen Wert der Extremitäten und ihrer Skelettelemente. Besonders vom entwickelungsgeschichtlichen, vergleichend-anatomischen und paläontologischen Gesichtspunkte aus suchte man die Lösung; b) die nach dem Uebergang der vielstrahligen Flosse zur fünfzehigen Extremität. — Eine allseitig anerkannte Lösung beider Fragen ist noch nicht gefunden. Zur Beantwortung der ersten Frage sind besonders 2 Hypothesen ausgearbeitet worden:

Die eine betont die Aehnlichkeit der Gürtel und der zugehörigen Glieder mit den Kiemenbögen und Kiemenstrahlen. Der Bogen wurde zum Gürtel. Ein Strahl wuchs besonders stark aus und wurde zum Träger für die anderen. So entstand die biseriale Flossenform (das Archipterygium) (Theorie Gegenbaurs); — die andere Hypothese stützt sich auf die Aehnlichkeit des Skeletts der unpaaren und paarigen Flossen und zieht besonders ontogenetische Befunde heran. Man folgert: Wahrscheinlich setzte sich bei den Urvertebraten die unpaare Analflosse rechts und links horizontal nach vorn weiter fort in sogenannte Seitenfalten (oder Extremitätenleisten). Diese hatten dieselben Skelettelemente wie die unpaaren Flossen. Daraus differenzierten sich die Brust- und Bauchflossen heraus resp. die Extremitäten der Vierfüßler und zwar etwa auf folgende Art. Proximal verschmolzen die Flossenstrahlen zu einem kräftigen Basalstück, dem als Träger nun einseitig die übrigen Strahlen ansaßen (uniseriale Anordnung). Von dem Basalstück löste sich ein Stück proximal ab und wurde zum Gürtel unter Bildung eines Gelenkes (Vertreter: Wiedersheim, Schimkewitsch, Balfour, Dohrn). — Nach Gegenbaurs Hypothese soll der uniseriale Typ der Flosse der sekundäre sein, der biseriale Typ der primäre — nach der anderen wäre der uniseriale Typ primär. — Jedenfalls resultiert ein uniseriales Ichthyopterygium. Wie dieses zur fünfzehigen pentadactylen Extremität wird, ist die oben skizzierte zweite Frage —, aber diese ist noch keineswegs gelöst, wir wissen nur, daß sich die Umwandlung bei den Urlurchen (Stegocephalen) bereits vollzogen hat.

6a) Fische und Dipnoer. Bei den Selachiern sind Brust- und Bauchflossen wesentlich nach demselben uniserialen Typ gebaut. Man findet 2 resp. 3 knorpelige Hauptstücke (Pro-, Meso-, Metapterygium), die mit den Gürteln in Verbindung stehen. Sie sind entstanden zu denken durch das Verschmelzen der proximalen Enden von Flossenstrahlen (Radien). An den Radien sitzen peripher noch Hornfäden. Bei manchen Formen (z. B. Scymnus) sitzen alle Radien an einem einzigen Basalknorpel (Basipterygium), der am Gürtel eingelenkt ist (Fig. 54).

Bei den Ganoiden und Teleosteern finden

wir ein mehr oder minder mächtiges knöchernes Basipterygium, das früher vielfach fälschlich bei den Bauchflossen als Beckenplatte angesehen wurde (Fig. 49). Daran schließen sich peripher bei den Ganoiden Radien (knorpelig und knöchern), die den Teleosteern fehlen und endlich knöcherne Flossenstrahlen. Letztere können modifiziert

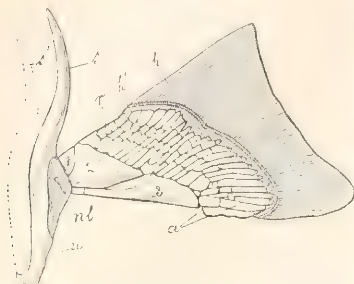


Fig. 54. Linker Brustgürtel und Flosse eines Haies (Heptanchus), ss' Scapulae, u unterer Gürtelteil, nl Nervenloch, 1, 2, 3 Pro-, Meso-, Metapterygium, a Haupt-, r Nebenreihen der Radien, h Hornfäden. Nach R. Hertwig.

sein, wie bei den unpaaren Flossen. — Einen eigenartigen Flossentyp zeigten die Dipnoer, er ist im Gegensatz zu den Selachiern biserial. Wir haben eine kräftige Haupt- (oder axiale) Reihe. Das erste an den Gürtel anschließende Stück ist ohne Radien, die anderen sind mit gegliederten Radien besetzt. Außerdem besitzt die Ceratodusflosse noch Hornfäden (Fig. 55).



Fig. 55. Bauchflosse von Ceratodus Forsteri. p Becken, a Zwischenstück ohne Radien r, Hauptreihe h, Hornfäden e. Nach Goodrich.

Allgemeine Bemerkungen über die Gliedmaßen der Vierfüßler. Von den Amphibien an aufwärts sind die Extremitäten zu Fortbewegungsorganen auf festem Boden entwickelt. Ein bei allen Gruppen wiederkehrendes fünfstrahliges Grundschema des Baues läßt sich feststellen, wenn auch mancherlei Abweichungen, durch besondere Lebensgewohnheiten bedingt, auftreten. Man bezeichnet dementsprechend alle Vierfüßler von den Amphibien ab als Pentadactylier. Im embryonalen Zustande gleicht die pentadactyle Extremität einer lappenähnlichen, am Bauch parallel zur Medianebene herabgeschlagenen Flosse. Leitet man die pentadactyle Extremität von den Flossen her, so muß natürlich auch im Laufe der phylogenetischen Umbildung eine Reduktion der Skelettelemente (der Radien) der Flosse stattgefunden haben, der kompliziertere Zustand wurde verlassen und ein einfacherer angestrebt. — Die Einzelvorgänge sind aber noch lange nicht klargelegt.

Zur Bewegung auf dem festen Boden wurde der neue Extremitätentyp aber nur dann wohl geeignet, wenn er sich in gegeneinander hebelartig wirkende bewegliche Teile gliederte (wie bei den Arthropoden). Vorder- und Hintergliedmaßen haben diese Gliederung in ganz übereinstimmender (homonomer) Weise durchgeführt. Wir erhalten nachfolgendes Schema (Fig. 56) (nach Schimkewitsch und Bütschli):



Fig. 56. Schema des Skeletts einer linken Tetrapodenextremität. A präaxialer Rand, St Stylopodium, Z Zeugopodium, Au Autopodium, C Carpus (Basipodium), M Metacarpus (Mesopodium), P Phalangen (Acropodium), 1 bis 5 die Finger. Nach Bütschli. Verändert.

I. Stylopodium, Oberarm(schenkel), bestehend aus Humerus (Oberarm), Femur (Oberschenkel).

II. Zeugopodium, Unterarm(schenkel), bestehend aus Radius (Speiche) + Tibia (Schienbein) = cranialgelagert und Ulna (Elle) + Fibula (Wadenbein) = caudalgelagert.

III. Autopodium, bestehend aus a) Basipodium = Carpus (Tarsus), Hand-(Fuß)wurzel mit Radiale (Tibiale), Ulnare (Fibulare), Intermedium, Centrale 1 und 2, 1. bis 5. Carpale (Tarsale) distale; b) Mesopodium = Metacarpus (— Tarsus), Mittelhand (— Fuß) mit I. bis V. Metacarpale (— Tarsale); c) Acropodium = Phalanges digitorum, Finger(Zehen)glieder, Finger(Zehe) 1—5.

Bei der Herleitung des Chiropterygiums von der Fischflosse kann man für dasselbe ein biseriales oder uniseriales Schema konstruieren, je nachdem man sich den Hauptstrahl (die Axialreihe) verlaufend denkt. — Eine Anzahl der Forscher nimmt mit Gegenbaur an, daß der Hauptstrahl wie folgt verläuft: Humerus (Femur) — Ulna (Fibula) — Ulnare (Fibulare) — V. Carpale (V. Tarsale) — V. Metacarpale (V. Metatarsale) — 5. (kleiner) Finger (5. kleine Zehe). Von diesem Hauptstrahl gehen (uniserial) die Seitenstrahlen (1 bis 4) ab. Seitenstrahl 1 läuft: Radius (Tibia) — Radiale (Tibiale). I. Carpale (I. Tarsale) — I. Metacarpale (I. Metatarsale) — 1. Daumenfinger (1. große Zehe). — Seitenstrahl 2 läuft: Intermedium — Centrale 1 — II. Carpale (II. Tarsale) — 2. Zeigefinger (2. Zehe). Seitenstrahl 3 und 4 entsprechende Finger.

Andere Forscher konstruieren folgenden Verlauf des Hauptstrahls (biserialer Typ). Der Hauptstrahl geht: Humerus (Femur) — Ulna (Fibula) — Intermedium — Centralia — II. Carpale (II. Tarsale) — II. Metacarpale (II. Metatarsale) — 2. Zeigefinger (2. Zehe). Der Hauptstrahl hätte dann auf der einen Seite 3 Seitenstrahlen (3. 4. 5.) — auf der anderen 1 (1.).

Da das Extremitätenskelett aus verschiedenen zueinander beweglichen Teilen besteht, so kommt es zur Ausbildung von bestimmten, immer wiederkehrenden Gelenken. Der Oberarm (Oberschenkel) ist mit dem Schulter-(Becken)gürtel durch ein Kugelgelenk verbunden, welches in der Gelenkpfanne (Acetabulum humeri resp. Acetabulum femoris) sich bewegt. Zwischen Oberarm (Oberschenkel) und Unterarm (Schenkel) bildet sich das etwas komplizierte Ellenbogen(Knie)-gelenk, welche ersteres auch eine Drehung des Unterarms um die Längsachse zuläßt. Die Hand (Fuß) besteht aus einer größeren Anzahl Knochen, ja es zeigt die Carpal-(Tarsal)region eine außerordentliche Mannigfaltigkeit in bezug auf die Skelettelemente und infolgedessen sind viele Gelenke vorhanden, die eine große Bewegungsfreiheit der Hand (Fuß) zum Unterarm (Schenkel) einerseits und der Mittelhand (Fuß) zu den Fingern (Zehen) andererseits gestatten.

Die Extremitäten sind in der Ruhelage winkelig zueinander gestellt. Der Winkel, den das Ellenbogengelenk bildet, ist nach vorn zu offen, der Scheitel liegt caudalwärts — umgekehrt ist es beim Kniegelenk —, hier ist der Winkel nach hinten offen, der Scheitel liegt cranial. — Es dienen die Vorderfüße besonders zum Vorwärtsziehen des Körpers durch Beugung des Unterarms; die Hinterfüße zum Vorwärtschieben durch Streckung des Unterschenkels. Es hängt dies eng mit der Art der Befestigung der zu den Extremitäten gehörigen Gürtel zusammen. Der Schultergürtel ist nur lose befestigt durch die Vermittlung der Claviculae; der Beckengürtel aber fest mit den Sacralwirbeln verwachsen. — Typisch, wie schon erwähnt, ist das Ausstrahlen der Hand (Fuß) in 5 Finger (Zehen), wobei man die am Vorder- oder Präaxialrand (Radialrand) stehenden als erste bezeichnet. — Vielfach nehmen die Autoren eine 7-Zahl der ursprünglichen Phalangen an, obwohl es nicht sicher erwiesen ist. Neben dem 1. und 5. Finger (Zehe) würde noch ein Strahl zu stehen kommen am präaxialen resp. postaxialen Rande. — Man bezeichnet diese Strahlen als **Präpollex** resp. **Prähallux** (vor dem 1.) und **Postminimus** (neben dem 5.). — Phalangen können auch umgekehrt reduziert sein und dies ist wohl der häufigere Fall; namentlich treten im Bereich der Carpalia und Tarsalia Reduktionen und Verwachsungen in allen möglichen Varianten auf. — Schließlich findet man im Autopodium besonders noch akzessorische Knöchelchen, die auf Sehnen- und Bänderverknöcherungen zurückzuführen sind. Man bezeichnet sie als **Sesambeine**, doch ist es oft sehr fraglich, welcher Natur überzählige Skelettelemente sind.

6b) **Amphibien.** Die Verhältnisse liegen ziemlich primitiv und im wesentlichen entsprechen sie dem geschilderten Urtypus. Zumeist kommen bei ihnen der Hand nur 4, dem Fuß 5 Phalangen zu, ja nicht selten hat man am Fuß eine überzählige 6. Phalanx. Centralia besitzen die Urodelen meist zwei. Der Humerus der Schwanzlurche hat am proximalen Ende, unterhalb des Gelenkkopfs, 2 kleine Höcker und zwar ein cranialwärts liegendes **Tuberculum radialis** (**majus**) und ein entgegengesetztes **Tuberculum ulnaris** (**minus**), an denen Vor- und Rückziehmuskeln sitzen. Das distale Humerusende besitzt 2 gewölbte Gelenkflächen, die vordere für den Radius, die hintere für die Ulna, welch letztere über das Ellenbogengelenk etwas vorspringt (sogenanntes **Olecranon**). Dieser Fortsatz hemmt den Unterarm nach erfolgter Streckung. — Das Extremitätenskelett der Anura hat einige Besonderheiten. Meist fehlt das Intermedium. Radius und Ulna vorn, Fibula und Tibia hinten sind verwachsen. — Der Femur ist sehr lang, ebenso Tibiale und Fibulare und dienen als Sprunghebel. Carpalia und Tarsalia sind meist verwachsen oder reduziert, eine Deutung ist recht schwierig. — Den Gymnophionen fehlen die Extremitäten völlig, Siren (Urodela) die Hinterbeine.

6c) **Reptilien.** Ehe wir die normalen Extremitätenskelette betrachten, sollen einige Bemerkungen über Formen mit sekundär verändertem Skelett vorangehen. Manchen Eidechsen (Anguis; Pseudopus) und den Schlangen fehlen die Extremitäten oder sind auf ein Minimum reduziert. Bei der Riesenschlange (Phyton) sind nur 2 kleine Knochen vorhanden; der basale wird

als Femur angesehen, der distale als Tibia, letzterer trägt eine Kralle. Die übrigen vierfüßigen Reptilien zeigen im allgemeinen besonders in dem Handskelett Verhältnisse, die sich an die der Amphibien anschließen. So sind bei Hatteria (Rhynchocephalen) und Schildkröten noch 2 eventuell 3 Centralia vorhanden. Carpal- und Tarsalelemente zeigen im Alter Neigung zu mannigfachen Verschmelzungen, in der Anlage sind sie vielfach noch gesondert, so tritt das Intermedium z. B. nur embryonal auf und verschmilzt später mit benachbarten Knochen.

Der Humerus ist gut entwickelt, der Gelenkkopf liegt zwischen dem Tuberculum radialis und ulnaris. Das Distalende zeigt 2 Gelenkflächen, den Epicondylus radialis und ulnaris und außerdem besonders bei Sauriern und Cheloniern Löcher für den Durchtritt des Nervus radialis, es ist das Foramen radiale seu ectepicondyloideum. Bei Hatteria und † Theromorpha tritt auch ein Foramen ulnare auf, zum Durchtritt des Nervus medianus und der Arteria brachialis. Saurier und Schildkröten haben ein kräftiges Olecranon, bei Krokodilen ist es schwach entwickelt. — Am Femurkopf sitzen bei den Reptilien rechts und links je ein Trochanter tibialis (minor) und fibularis (major) („Rollhügel") an, bei Krokodilen sind sie mehr rückgebildet. Die Tibia ist stärker als die Fibula, wie auch die Ulna stärker als der Radius war, bei fast allen Reptilien. Zu erwähnen ist noch, daß die Tibia mit ihrem breiten proximalen Ende auf den Epicondylus fibularis (externus) übergreift. Am weitesten haben sich die Krokodile von der ursprünglichen Form entfernt. In der Handwurzel tritt in der proximalen Reihe nur ein Ulnare und Radiale auf; vielfach kommt allerdings ein akzessorischer Knochen vor, ein sogenanntes ulnares Sesamoid (das Os pisiforme, Erbsenbein der Säuger), auch als postaxialer 6. Finger angesehen. In der distalen Reihe ist wahrscheinlich Intermedium + Centrale + Carpale I zu einem Knochen geworden; Carpale II ist für sich, Carpale III bis V sind einheitlich. Andere Autoren nehmen an, das Intermedium sei mit dem Radiale (auch als Astragalus bezeichnet) vereinigt.

Auch in der Hinterextremität sind in der proximalen Reihe nur 2 Knochen. Wir finden Tibiale, Intermedium und Centrale zu dem großen Tritibiale oder Astragalus (Würfel- oder Sprungbein) vereinigt und schließen sich eng an die Tibia an. Das Fibulare ist gleichfalls groß und wird als Calcaneus (Fersenbein) bezeichnet. Ein hinterer Fortsatz gibt den Ansatz für die Sehne des Fußstreckers (Fig. 57, A und B).

Sekundäre Umformungen zeigen die Extremitäten der Meerschildkröten, die wieder flossenähnlich geworden sind. Auch die † Ichthyosaurier haben ein einfaches Flossenskelett. Radialia und Ulna sind kurz, die Phalangenzahl vervielfacht. Die Flugsaurier (Pterosaurier) besaßen einen sehr langen Arm. Finger 1 bis 3 ist frei, der 4. ist enorm verlängert und trägt die Flughaut.

6d) Vögel. Das Extremitätenskelett ist hier so typisch umgebildet wie in kaum

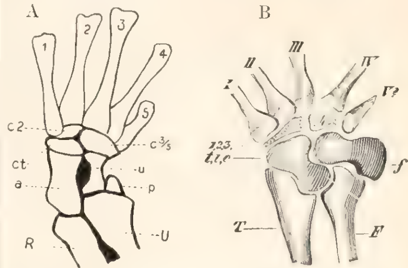


Fig. 57. A vordere Extremität vom (Carpus) Alligator juv. R Radius, U Ulna, u Ulnare, a Astragalus = Radiale + Intermedium, p Pisiforme, ct Centrale 1 und 2 + Carpale 1, c2 Carpale 2, $c^{3}/_{5}$ Carpalia 3 bis 5 — Metacarpalia 1, 2, 3, 4, 5. Nach Schimkewitsch. Verändert. Fenster schwarz. B Tarsus vom Krokodil, rechte Seite; T Tibia, F Fibula, f Fibulare (Calcaneus), t, i, c = Astragalus (Tibiale, Intermedium, Centrale); 1, 2, 3, 4 Tarsalia, I bis V Metatarsalia. Nach Wiedersheim.

einer Gruppe. Sowohl Ober- wie Vorderarm wurden sehr lang. Das proximale Oberarmende zeigt einen breiten Condylus nebst Tuberculum ulnare und radiale sowie ein Loch für den Eintritt der Luft aus dem Luftsack. Diese Knochen der Vögel sind hohl, nicht markhaltig und mit Luft gefüllt, sogenannte pneumatische Knochen. Radius und Ulna sind getrennt, letztere ~~sind~~ ist sehr kräftig und vielfach mit Knötchen am Hinterrand, die durch die Follikel der Schwungfedern erzeugt werden.

Handwurzel und Finger sind stark reduziert, doch treten embryonal meist noch 7 Knochenstücke auf, die dann verschmelzen. Im fertigen Zustand sind vorhanden: a) proximal ein Radiale (wahrscheinlich Radiale und Intermedium) und Ulnare (wahrscheinlich Ulnare und Centrale); b) distal; ein Carpale (wahrscheinlich aus Carpale 2 + 3 + 4), das aber selbst wieder mit dem Metacarpale verschmilzt. Die Metacarpalia sind ziemlich lang, es sind vorhanden II bis IV (nach anderen Autoren I bis III). Auch sie verwachsen an ihren Enden miteinander. Die Anlage eines V. Metacarpale verwächst völlig

mit dem IV. Von den Fingern sind 2. und 4. sehr kurz (eingliederig), der 3. ist viel länger (zweigliedrig) (Fig. 58). — Endklauen besitzen nur wenige Vögel (z. B. Ratiten). Der †Archäopteryx hatte noch freie Metacarpen und Finger 1 bis 3 mit Krallen. Die Füße der Vögel zeigen deutlich die Verwandtschaft dieser Gruppe mit den Reptilien. Der Vogelfuß erscheint als eine ganz extreme Weiterbildung der dort angebahnten Verhältnisse. Der Femur ist kurz und in Haut und Muskeln eingesenkt, der Condylus ist stark hervortretend und nach innen gerichtet, so daß er senkrecht zur inneren Femurseite steht. Die Tibia ist viel kräftiger als die im Distalende reduzierte Fibula; aber es bleibt der Condylus letzterer erhalten. An der Vorderseite des Kniegelenks liegt eine ansehnliche Kniescheibe (Patella). In der Fußwurzel findet man im Embryonalzustande ein Fibulare und Tibiale (proximal) und ein breites Knochenstück (Tarsalia 2 bis 4) distal. Das Tibiale ist wohl gleich dem Tritibiale, das Fibulare gleich dem Fibulare der Reptilien. Dieses Tibiale und Fibulare verwächst, man bezeichnet es auch als Astragalus der Vögel, und dieser Astragalus vereinigt sich nun selbst fest mit der Tibia. Die distalen verschmolzenen Tarsalia verwachsen mit den Metatarsus II bis IV. Somit ist unter Bildung eines Intertarsalgelenks (fälschlich oft als Knie bezeichnet) der Tarsus gänzlich geschwunden. Die 5. Zehe mit dem zugehörigen Metatarsus fehlt ganz. Die Metatarsalia II bis IV verwachsen gänzlich zu dem großen „Lauf" (Tarso-metatarsale), der ja proximal mit den Tarsalia 2 bis 4 verwachsen ist. Zehe 1 hat einen kleinen, am Lauf angefügten Metatarsus I, sie ist meist nach hinten gerichtet. Zehe 2 bis 4 sitzen am Lauf. Die Finger haben 2 bis 5 Glieder mit Krallen. Den Ratiten fehlt häufig Zehe 1 und 2 (Fig. 59).

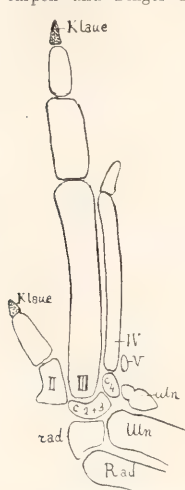


Fig. 58. Carpus des Embryo von Sterna Wilsonii. Beginnende Verknöcherung. c2 + 3 Carpale 2 und 3, c4 Carpale 4, c2 + 3 + 4 verschmelzen später mit Mtc. III. II bis V zweites bis fünftes Metacarpale, rad Radiale, uln Ulnare, dahinter Radius und Ulna (nach anderen Autoren ist Metacarpale II = I usw.). Nach Wiedersheim.

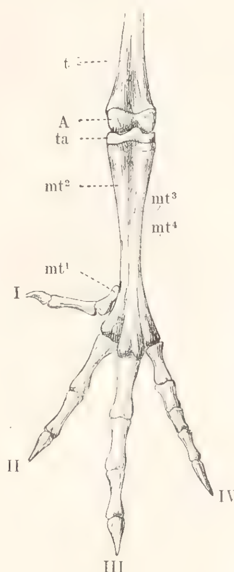


Fig. 59. Fuß eines jungen Huhnes. t Tibia; A Astragalus (Tibiale + Fibulare), ta Tarsalia 2 bis 4 verwachsen, zwischen A und ta das Intertarsalgelenk, mt 1 bis 4 die Metatarsalia, mt¹ nach hinten gerichtet, mt² verwachsen, I bis IV die Zehen mit Krallen. Nach Boas.

6e) Säuger. In keiner Wirbeltiergruppe sind die Extremitätenskelette so mannigfach modifiziert als hier. Bei den niederen Säugern sind es Gehwerkzeuge, und von diesen aus haben sich die speziellen Formen entwickelt. Vor allem zeigen die Vorderextremitäten eine Umgestaltung zu Grabwerkzeugen, zu Flossen, zu Flügeln, zu Greiforganen und zu ausschließlichen Bewegungsorganen. Wir werden zunächst das Skelett der Vorderextremität besprechen, dann das der Hinterextremität und hieran anschließend kurz die besonderen Verhältnisse bei den Huftieren, Fledermäusen, Cetaceen und Primaten.

α) Vorderextremitäten. Der Oberarm ist gut entwickelt mit markanten Ansatzstellen der Muskeln. Die proximale Epiphyse bildet den Humeruskopf, der das Schulter-

gelenk (Articulatio humeri) mit der Scapula bildet. Ober- und Vorderarm bilden das Ellenbogengelenk (Articulatio cubiti). Die Tubercula: radialis (majus) und ulnaris (minus) sind vielfach sehr groß und laufen distal in Leisten (Spinae) aus. Das distale Oberarmende hat eine breite rollenartige Gelenkfläche für die Ulna, die sogenannte Rolle oder Trochlea und eine etwas kugelige Gelenkfläche (Capitulum) für den Radius. Die Gelenkflächen schließen sich an den Entepicondylus = Epicondylus radialis s. lateralis und an den Ectepicondylus = Epicondylus ulnaris s. medialis an.

Der Vorderarm (Antebrachium) ist immer aus Radius und Ulna gebildet, letztere ist das kräftigere Element. Beide bilden das Ellenbogengelenk mit dem Humerus. Die Ulna hat ein weit vorspringendes Olecranon (seu Processus anconaeus) und vermittelt hauptsächlich die Humerusverbindung, dessen Trochlea in dem tiefen Gelenkausschnitt (Fossa sigmoides major) sitzt, das distale Ende hat umgekehrt weniger Gelenkverbindung mit dem Carpus. Hier vergrößert sich besonders bei typischer Supination die Gelenkung des Radius mit dem Carpus auf Kosten der Ulna. Je mehr die Hand Greiforgan wird, desto beweglicher wird auch der Vorderarm und zwar wird eine Drehung des distalen Radiusendes um die feststehende Ulna als Achse möglich. Kommt der Handrücken nach oben zu stehen, so spricht man von Pronatio, sieht die Handfläche nach oben von Supinatio. Es hängt diese Eigentümlichkeit mit einer Stellungsänderung des Humerus zusammen. Ursprünglich war die Hand in Pronation. Das distale Humerusgelenk war parallel zur Medianebene gerichtet. Es drehte sich der Oberarm nun derart, daß das Ellenbogengelenk anstatt nach außen, nach hinten mit dem Scheitel zu liegen kam und der Epicondylus ulnaris anstatt parallel zur Medianebene senkrecht zu dieser gerichtet wurde. Der Epicondylus radialis schaut nun nicht mehr vorwärts, sondern nach außen. Die Hand behält aber ihre ursprüngliche Lage bei, infolgedessen überkreuzen sich Radius und Elle in der Mitte. Pronationsstellung der Hand. Die Drehbewegung ist aber möglich und dadurch werden die Knochen des Vorderarms wieder parallel gestellt, Supination der Hand (Fig. 60). Die Handwurzel

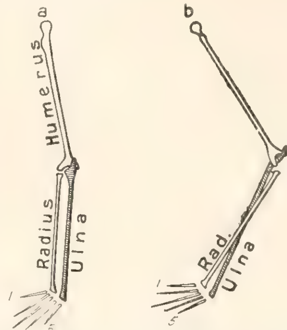


Fig. 60. Schema der Entstehung der Kreuzung der Unterarmknochen. a ursprüngliche Stellung, Ellenbogen nach außen, b Ellenbogen nach hinten und gegen die Medianebene verlagert. Nach Bütschli.

(Carpus) und die Hand (Manus) hat außerdem vielerlei funktionelle Anpassungen.

Ihre Grundform läßt sich wie folgt darstellen (nach Weber). In der menschlichen Anatomie haben die Carpalia besondere Namen, die unten angegeben sind, zumal sie auch in der tierischen Anatomie Verwendung finden.

Radius		Ulna		Pisiforme = Erbsenbein		
Radiale	—	Intermedium	—	Ulnare	Procarpus	Carpus
Carpale 1	— Carp. 2	— Carp. 3	— Carp. 4	— Carp. 5	Mesocarpus	
Metacarpale I	— Mt. II	— Mt. III	— Mt. IV	— Mt. V	Metacarpus	
Phalanx 1	— Ph. 1	— Ph. 1	— Ph. 1	— Ph. 1	Digiti	
„ 2	— „ 2	— „ 2	— „ 2	— „ 2		
„	„ 3	— „ 3	— „ 3	— „ 3		
Digitus I Pollex	Dig. II Index	Dig. III Medius	Dig. IV Annularis	Dig. V Minimus		

Bezeichnung der Carpalia beim Menschen.

Radiale	Scaphoid, Naviculare (Kahnbein)
Intermedium	Lunatum, Semilunare (Mondbein)
Ulnare	Triquestrum, Cuneiforme, Pyramidale
Centrale	(Intermedium [Cuvier])
Carpale 1	Trapezium, Multangulum majus
Carpale 2	Trapezoid, Multangulum minus
Carpale 3	Capitatum, Magnum
Carp. 4 u. 5	Hamatum, Uncinatum (Hakenbein), Unciforme.

Der Carpus zeigt ziemlich primitive Verhältnisse. 3 Skelettelemente liegen (zum mindesten in der Anlage) proximal; 5 distal, wobei die Carpalia 4 und 5 immer verschmelzen, eine Besonderheit der Säuger. Außer dieser ständigen Vereinigung von Carpale 4 und 5 können noch unter den anderen Knochen des Carpus Verschmelzungen eintreten. Nachembryonal ist höchstens ein Centrale vor-

handen, vielfach verschmilzt auch dieses mit benachbarten Knochen (besonders mit dem Naviculare).

Ein Os pisiforme am Ulnarrand und ein Präpollex sind vielfach vorhanden als akzessorische Elemente.

In den Metacarpo-phalangeal-Gelenken findet man bei Säugern sehr häufig noch Sesambeine, paarige Knöchelchen, die die Beugebewegungen regeln.

Die Phalangenzahl ist fast stets Digitus I = 2; Digitus II bis V = 3. Die End- oder Nagelphalanx kann verschiedene Gestalt haben, je nachdem ob Huf, Kralle, Nagel vorhanden ist.

Berührt beim Laufen die ganze Hand den Boden, so bezeichnet man sie als Plantigrad (z. B. Insektivoren). Legen sich nur noch die Finger auf, so spricht man von digitigradem Typus (z. B. Carnivora zum Teil). Steht die Hand nur mit den Endphalangen auf, so bezeichnet man sie als unguligrad (Huftiere) (Fig. 62).

Besonderheiten im Vorderextremitätenskelett haben wir, wie schon eingangs betont, viele. Hier sollen die wichtigsten kurz besprochen werden. — Eine typische Grabhand hat der Maulwurf. Die Knochen sind kurz und gedrungen. Hand- und Fußwurzel sind sehr kräftig und stark verbreitert, die großen Finger tragen starke Nägel. Eine Schwimmextremität besitzen die Wale. Die Phalangen sind stark verlängert. Die Zahl der Fingerglieder ist vervielfacht bis 14. Ober- und Vorderarm sind ganz kurz und gedrungen. Außer dem Schultergelenk sind die Skelettelemente nicht mehr gelenkig verbunden, so daß die Flosse als Ganzes wirkt (Fig. 61).

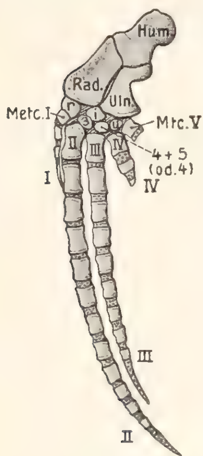


Fig. 61. Linker Arm vom Zahnwal (Globicephalus). r Radiale, i Intermedium, u Ulnare, Metc. I bis V Metacarpalia I bis V; 3, 4 + 5 die entsprechenden Carpalia, I bis IV die Finger mit den Gliedern. Nach Bütschli.

Der Arm (die Flugextremität) der Chiropteren zeigt einen großen Humerus. Enorm lang ist der Radius, die Ulna ist klein und verkümmert. Im Ellbogengelenk findet man einen kleinen Knochen, die Patella brachialis, eine Verknöcherung der Sehne des Unterarmstreckers. Im Carpus sind verschiedene Teile verschmolzen. Ungeheuer lang und dünn sind die Metacarpalia II bis V, ebenso die dazugehörigen Phalangen 2 bis 5. Der erste kurze Finger ist frei und noch mit Kralle, die den Flugfingern fehlt. Die Flughaut ist also zwischen den Metacarpen II bis V, den Fingern 2 bis 5, dem Arm und Körper ausgespannt.

Sehr interessante Verhältnisse zeigen die Vorderextremitäten der Huftiere (Ungulaten). Bei dieser großen Gruppe werden die Füße von dem Urzustande ausgehend immer mehr für eine einfache Vor-rückwärtspendelbewegung (Laufextremität) ausgebildet. Der anfänglich plantigrade Fuß wird digitigrad und schließlich extrem unguligrad. Mit der einfachen Bewegung fällt die axiale Drehbewegung des Antebrachiums fort. Der Radius wird stärker, die Ulna im distalen Teil schwächer und verwächst mit dem Radius. Das Olecranon bleibt sehr stark erhalten. Das proximale Radiusende breitet sich mehr und mehr auf der Trochlea aus und für die Ulna, die hinter den Radius zu liegen kommt, bleibt nur der hintere Trochleateil übrig. Von den Urungulaten haben sich 2 große Gruppen entwickelt: α) die Unpaarzeher oder Perissodactyla (Tapiere, Nashörner, Pferde); β) die Artiodactyla (Schweine, Hirsche, Kamele, Schafe, Antilopen, Rinder).

In beiden Gruppen zeigen die Metacarpalia und die entsprechenden Phalangen ganz typische Veränderungen, es gilt dies, um es gleich hier zu bemerken, für beide Extremitätenpaare. Die Metacarpalia III und IV mit ihren Fingern werden sehr stark und lang; Metacarpalia I, II und V (dies am ersten) bilden sich zurück. Der Carpus erleidet verhältnismäßig wenig Umgestaltung (Fig. 62).

α) Perissodactyla. Es verkümmert durchgängig der 1. Finger mit seinem Metacarpus. Beim Tapier ist der 5. noch erhalten, der 3. ist der stärkste. Der 2. und 4. treffen bei Tapier und Nashorn noch auf den Boden auf. Bei den Pferden fehlt Finger und Metacarpalia 1 und 5 ganz; Finger 2 und 4 fehlen ganz, die zugehörigen Metacarpalia II und IV sitzen dem stark verlängerten III. Metacarpalia (sogenannter Lauf) als Griffelbeine an.

β) Artiodactyla. Metacarpus III und IV nebst Phalangen sind hier kräftig ausgebildet, rechts und links davon liegt II. und V.,

aber schwächer entwickelt (z. B. beim Schwein, das noch 4 Zehen hat). Metacarpus II und V nebst ihren Zehen verkümmern mehr und mehr und beim Kamel z. B., als Endglied in dieser Reihe, sind nur noch Metacarpus II und IV nebst Phalangen erhalten.

Bei der Greifhand der Primaten kann der Daumen (Pollex) stark gegen die innere Handfläche gebeugt (opponiert) werden, was auf der Gelenkanordnung am Carpale 1 (Trapezium) und des Metacarpus I (mit Sattelgelenk) beruht.

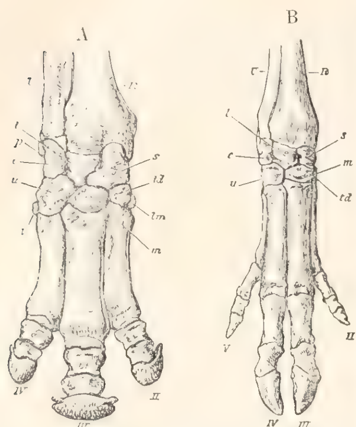


Fig. 62. Vorderfuß, unguligrad, eines Unpaarzehers (Nashorn) A und eines Paarzehers (Schwein) B; U — R = Ulna — Radius, p Erbsenbein, s, l, c erste Reihe der Handwurzel (Naviculare, Lunatum, Triquestrum), tm, td, m, u zweite Reihe der Handwurzel (Multangulum majus, M. minus, Capitatum, Hamatum), II bis V zweiter bis fünfter Finger. Nach Boas.

β) Hinterextremität. Der Oberschenkel ist lang und sitzt mit dem Gelenkkopf (Caput femoris) in der Gelenkpfanne (Acetabulum femoris) am Becken (Pelvis). Beide Knochen bilden das Hüftgelenk (Articulatio coxae).

Unterhalb des Gelenkkopfes sitzen zwei Trochanteren. Der kleinere, mehr nach innen gewendete ist der Trochanter minor oder internus (tibialis); der größere, in die Crista glutaei distal auslaufend ist der Trochanter major s. externus (fibularis). Der distale Oberschenkel hat zwei Condylia: den Epicondylus tibialis s. medialis und fibularis s. lateralis.

Die Knochen des Unterschenkels sind die stets stärkere Tibia (Schienbein) und die schwächere Fibula (Wadenbein). Erstere artikuliert stets mit beiden Femurcondylia; das Wadenbein artikuliert mit seinem Condylus am Condylus lateralis des Femur, falls es nicht mit dem Schienbein verwächst. — Die Fibula zeigt Neigung zur Rudimentation, ist die Ulna rudimentär, dann ist es auch meist die Fibula, besonders bei Huftieren. Die distalen Enden der Unterschenkelknochen springen vielfach über das Fußgelenk vor und bilden den Malleolus externus-lateralis (Fibula) und den Malleolus internus (medialis) (Tibia). Verkümmert das Wadenbein, so bleibt doch meist der mit dem Schienbein fest verwachsene Malleolus externus übrig. — Oberschenkel und Unterschenkel bilden das Kniegelenk (Articulatio genu). An der Vorderfläche ist die ansehnliche Kniescheibe (Patella), ein Sesamknochen des Musculus triceps femoris. An der caudalen Knieseite kommen akzessorische Knöchelchen (sogenannte Flabellae) vor, in der Sehne des Musculus gastrocnemicus.

Der Tarsus ist ziemlich ursprünglich, bildet nie ein Intertarsalgelenk wie bei den Sauriern. Proximal hat man zwei Knochen (andere Autoren sagen 3; je nachdem man das Naviculare [= Centrale = Scaphoid] bewertet), den tibialen Talus

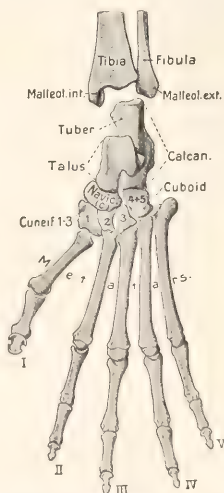


Fig. 63. Skelett des linken Fußes von Inuus ecaudatus (Affe). Von der Dorsalseite. I bis V die Zehen, Tarsalia 1 bis 3 = Ento-, Meso-, Ectocuneiforme, Tars. 4 + 5 = Cuboid, Navic (c) Naviculare, hier wohl ein Centrale. Nach Bütschli.

(= Astragalus = Sprungbein) und den fibularen Calcaneus (= Fersenbein).

Die distale Reihe hat 4 Knochen: Tarsus 1 bis 3 (Ento-, Meso-, Ectocuneiforme) getrennt; Tarsus 4 und 5 verschmolzen zum Cuboid. Zwischen diesen beiden Reihen schiebt sich noch das Centrale (= Scaphoid = Naviculare) ein (Fig. 63).

Ueber die Deutung der einzelnen Knochen ist noch keine Einigkeit erzielt. Die einen sagen: Talus = Intermedium + Tibiale; die anderen rechnen das Tibiale zum Centrale und sagen Tibiale + Centrale = Naviculare oder nehmen an, das Tibiale sei rudimentär. Für den Fuß erhalten wir folgendes Schema der Knochenanordnung nach Weber.

Tibia			Fibula		
Tibiale + Intermedium = Talus →	Centrale Naviculare = Scaphoid		Fibulare = Calcaneus	Protarsus	Tarsus
Tarsale 1 —	Tarsale 2 —	Tarsale 3	Tarsale 4 + 5	Mesotarsus	
(Ento-	Meso-	Ectocuneiforme)	Cuboid		Metatarsus
Metatars. I —	Metatars. II —	Metatars. III —	Metatars. IV —	Metatars. V	
Phalanx 1 —	Phalanx 1	Phalanx 1 —	Phalanx 1 —	Phalanx 1	Digiti
,, 2 -	,, 2 —	,, 2 —	,, 2 —	,, 2	
	,, 3 —	,, 3	,, 3 ·	,, 3	
Digitus I — (Hallux)	Digitus II ·	Digitus III —	Digitus IV —	Digitus V	

Der Talus und Tibia bilden das Haupt- oder Sprunggelenk (Articulatio talocruralis).

Zur Führung des Gelenks dient der Malleolus internus an der Tibia. Der Calcaneus beteiligt sich nur bei den älteren Säugern noch am Fußgelenk und artikuliert dann mit der Fibula (z. B. bei Monotremen). Meist ist der Calcaneus nach rückwärts verlängert zum Fersenhöcker (Tuber), an dem die Achillessehne ansetzt und so die eigentliche Ferse (Calx) bildet (Fig. 63).

Die Rückbildung der Zehen und der Metatarsalia ist häufig. Besonders bei Ungulaten tritt sie in fast denselben Modus ein wie bei der Vorderextremität. In demselben Maße wie die Zahl der Zehen reduziert wird (beim Tapir auf II. bis IV., beim Pferd auf III., Schwein II. bis V.), werden die zurückbleibenden Phalangen und ihre Metatarsen kräftiger, eventuell tritt gleiche Verwachsung wie vorn ein. — Die Endphalangen sind bei den Säugern mit Krallen, Nägeln, Hufen oder Klauen versehen, alle diese Gebilde sind epidermaler horniger Natur und nach demselben Typ gebaut.

Die Kralle, von der sich die anderen Formen leicht herleiten lassen, ist dütenförmig geformt. Dorsal und lateral ist die feste Krallenplatte, die am Grunde von einer Hautfalte, dem Krallenwall, bedeckt ist. Die ventrale Krallensohle ist aus lockerem Horn.

7. Schädelskelett. 7a) Allgemeines. In der Wirbeltierreihe fehlt nur dem Acranier (Amphioxus) der Schädel. Bereits bei den Cyclostomen ist er, zwar noch primitiv, vorhanden. Schädel und Wirbelsäule bilden das Achsenskelett — es haben sich aber beide Teile nach eigener Richtung entwickelt. Die sogenannte Wirbeltheorie des Schädels, schon von Goethe und Oken ausgearbeitet, sah zwar das Schädelskelett als eine Anzahl verschmolzener und modifizierter Wirbel an, es hat sich aber diese Hypothese nicht als haltbar herausgestellt. Richtig ist, daß nur ein Teil des Schädels, die Hinterhauptregion (Occipitalregion) auf Wirbelanlagen zurückzuführen ist und dieser Abschnitt kommt den meisten Wirbeltieren zu. Man bezeichnet ihn auch als Neocranium. — Der ursprüngliche und erste Grundstock des Schädels, das Paläocranium, läßt sich auf Wirbel nicht zurückführen. Neocranium und Paläocranium gehen aber die innigste Verbindung ein.

Für die Entwickelung eines besonderen hochkomplizierten Skelettapparates in der Kopfregion waren wohl verschiedene Punkte maßgebend. Zunächst waren es die sehr entwickelten Sinnesorgane Auge, Ohr und Nase und die damit zusammenhängende Hirnausbildung, die eine feste Stütze und schützende Hülle verlangten. Ferner konnte ein kräftiges Kopfskelett beim Schwimmen nur förderlich sein. Schließlich benötigte auch der Mund mit den Zähnen und der respiratorische Kiemendarm geeignete Stützelemente, wenn sie gut funktionieren sollten. Aus dem Zusammenwirken dieser verschiedenartigen Faktoren hat sich das Schädelskelett herausdifferenziert. Noch verhältnismäßig einfach bei den primitiven Formen, z. B. Haien, aber um so komplizierter und schwer verständlich bei den höheren Gruppen. —

Die Schädelknochen der Wirbeltiere bestehen außen aus massiven Tafeln, zwischen denen in der Mitte eine spongiöse Schicht (die sogenannte Diploe) liegt. In den Stirnknochen kommt es bei manchen Formen sogar zur Ausbildung großer Stirnhöhlen (Sinus frontalis), die mit der Nasenhöhle (Cavum nasi) in Verbindung stehen. Am Schädel lassen sich im ausgebildeten Zustande zwei Regionen unterscheiden: α) das Cranium cerebrale seu Neuro-

cranium oder der Hirnschädel; er nimmt die Sinnesorgane und das zum Hirn erweiterte Zentralnervensystem in sich auf; und β) das Cranium viscerale s. Splanchnocranium. Es ist serial angeordnet, umspannt bogenartig den Vorderdarm und erstreckt sich bei kiemenatmenden Tieren soweit caudalwärts als die Kiemenspalten den respiratorischen Darm durchbrechen. Kiemenspalte und Visceralbogen wechseln ab, so daß auf die letzte Spalte der letzte Bogen folgt. Der erste Bogen folgt auf die Mundspalte; er wird als Kieferskelett bezeichnet und gibt die Grundlage für das Gesichtsskelett der höchsten Formen (Säuger).

Es lassen sich im wesentlichen zwei Entwickelungsstufen des Schädelskeletts feststellen: α) das knorpelige Primordialcranium oder Chondrocranium: es findet sich bei Cyclostomen, Haien, Holocephalen und embryonal auch bei allen höheren Tieren in verschiedener Ausdehnung; β) das knöcherne Cranium: dieses verdrängt und ersetzt bei den höheren Tieren das embryonale knorpelige Cranium (teilweise kann das letztere auch dauernd erhalten bleiben). — Auch phylogenetisch ist das Primordialcranium das ältere und die ontogenetischen Phasen wiederholen in diesem Falle recht getreu die phylogenetischen Stufen (Fig. 64).

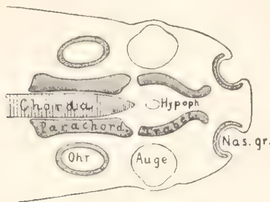


Fig. 64. Schema zur Entwickelung des Primordialcraniums. Nach Bütschli.

Das Primordialcranium entsteht etwa auf folgende Weise. Rechts und links vom vorderen Chordaende entwickeln sich 2 Knorpelstreifen (Parachordalia), die bis zur Chordaspitze reichen (sogenannter chordaler Schädelteil). Diese beiden Stücke werden nach vorn gleichsam verlängert durch zwei weitere Knorpelstücke, es sind dies die „Balken" (Trabeculae cranii), auch „Rathkesche Schädelbalken" genannt (sogenannter prächordaler Schädel). Diese ersten Anlagen finden wir in der Schädelbasis des Neurocraniums unterhalb des Hirns. — Parachordalia und Trabeculae verschmelzen zur Basalplatte, lassen aber median eine Oeffnung (Fenestra basicranialis anterior), für den unteren Hirnfortsatz, die Hypophyse, frei. Die weitere Ausgestaltung des Knorpelschädels geht etwa folgendermaßen vor sich, wenn wir von Besonderheiten absehen und nur die allgemeinen Verhältnisse im Auge behalten. Es differenzieren sich nach und nach etwa 4 Regionen am Schädel heraus, entsprechend der Anlage von Knorpelkomplexen. Die erste (vordere) Region ist Nasenregion (Pars naso-ethmoidea), auch nur als Ethmoidalregion bezeichnet. Um die Nasengruben bilden sich selbständig oder von den Trabekeln aus Knorpelkapseln. — Die Höhe der Augen bezeichnet man als Pars orbitotemporalis, auch als Sphenoidalregion. Hier finden wir vielfach ein Knorpelspangenpaar, die Sphenolateralia. — Die Ohrhöhe oder die Pars otica umfaßt die zeitig angelegten Ohrkapseln. — Endlich schließt sich hieran als vierte und letzte Region die Pars occipitalis oder die Occipitalregion, die in ihrer Anlage auch noch Andeutungen der Metamerie zeigt. Sie schließt (unter Gelenkbildung) an die Wirbelsäule an. — Diese 4 Knorpelregionen verwachsen nun lateral und dorsal miteinander, so daß es unter Hineinziehen der Schädelbasis zur Ausbildung der Knorpelkapsel kommt (Fig. 65, A und B). — Es lassen sich nun 2 Schädeltypen unterscheiden: α) Entwickeln sich die Augen sehr stark und schieben die Trabekeln daher gleichsam zusammen zum schmalen Septum interorbitale oder der Augenscheidewand, so wird der Schädel schmal oder kielbasisch (tropibasisch), das Gehirn reicht also nicht weit nach vorn; tropibasische Schädel haben Selachier, Ganoiden, Teleosteer, Vögel unter den Amniota. β) Bleibt der Augenabstand weit, so werden die Trabekeln nicht eng zusammengedrückt, das Gehirn hat Platz und reicht bis weit nach vorn an die Ethmoidalregion. Diese Schädel haben einige Selachier, Dipnoer und Amphibien. Man bezeichnet sie als plattbasische oder platybasische Schädel.

Das Visceralskelett hat nun gleichfalls ein Knorpelstadium, in dem es bei den Haien dauernd verharrt. Bei höheren Formen wird das Knorpelvisceralskelett unter mannigfacher Umbildung in ein knöchernes Stadium übergeführt. Die Visceralbogen sind im Anschluß an die Kiemenbildung entstanden (Branchiomerie). Meist zählt man 7 (selten 9) Bogen und zwar von vorn anfangend: 1. Mandibularbogen (Kieferbogen) bestehend oben aus dem Palatoquadratum = Gaumenknorpel, unten dem Mandibulare oder Meckelschen Knorpel = Unterkieferknorpel. 2. Zungenbeinbogen (Hyoidbogen), oben Hyomandibulare, unten Hyoid; 3. bis 7. sind die Kiemenbogen (Branchialbogen). Das Mandibulare ist mit dem Palatoquadratum, das Hyomandibulare mit der Ohrkapsel ge-

lenkig verbunden und dieses auch mit dem Hyoid. Der Zungenbeinbogen und die Kiemenbögen sind ventral durch die unpaare Copula verbunden. Bei †Fischen haben wahrscheinlich auch die ersten zwei Bogen respiratorische Funktion besessen, die rudimentäre 1. Kiemenspalte (das Spiraculum oder Spritzloch) weist darauf hin. — Vor den Kieferbogen findet man vielfach noch Lippenknorpel (Labialknorpel), deren Bedeutung fraglich ist (ob alte Visceralbogen oder ob Tentakelstützen).

Die ursprünglich einheitlichen Visceralbogen gliedern sich in verschiedene Stücke, die mit besonderem Namen belegt werden. Von oben (Fig. 65, A) angefangen heißen sie: α) Pharyngo-, β) Epi-, γ) Kerato-, δ) Hypobranchiale.

Regionen am Knorpelcranium 4 Gruppen feststellen:

1. Hinterhauptsknochen, Occipitalia (und zwar: Basioccipitale ventral; 2 Occipitalia lateralia seu Exoccipitalia; Supraoccipitale dorsal. Diese 4 Occipitalia verschmelzen bei Säugern zum Os occipitis = Hinterhauptsbein, das eine Oeffnung, das Foramen magnum, umschließt.

2. Gehörkapselknochen, Otica (und zwar Epioticum, Pteroticum, Sphenoticum, Prooticum, Opisthoticum. Bei Säugern verschmelzen diese Knochen jederseits zu einem Knochen, dem Petrosum oder Felsenbein.

3. Augengegendknochen, Sphenoidalia (auch Orbitotemporalknochen) (und zwar Präsphenoid; Alisphenoidea; Orbitosphenoidea; Basisphenoid).

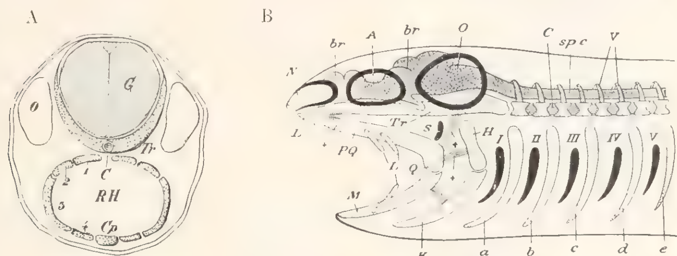


Fig. 65. A Querschnitt durch das primordiale Neuro- und Splanchnocranium. B Kopfskelett eines Selachierembryos. Beide Figuren schematisch. C Chorda, O Ohr-, A Augen-, N Nasenkapsel, RH Rachenhöhle, Tr Trabekeln und Parachondralia, 1 bis 4 die Teile der Visceralbögen (Pharyngo-, Epi-, Kerato-, Hypobranchiale) Cp Copula, G und br Gehirn, spc Rückenmark, V Wirbelbögen, a bis e Kiemenbögen, dazwischen I bis V die Kiemenspalten, H Hyomandibulare, K Hyoid, L Lippenknorpel, Q und PQ Quadratum und Palatoquadratum, das bei +-+ durch Bänder mit dem Schädel verbunden ist, M Mandibulare, S Spritzloch. Nach Wiedersheim.

Im Visceralskelett kann man einen vorderen Abschnitt bestehend aus Lippenknorpel, Kieferbogen, Hyomandibulare, und einen hinteren aus Hyoid, Branchialbogen, Copula unterscheiden. Bei lungenatmenden Tieren wird der hintere Abschnitt stark reduziert. Er liefert im wesentlichen das Zungenbein und Kehlkopfknorpel.

Betont wurde bereits, daß das Primordialcranium ganz oder zum Teil zugrunde geht und an seine Stelle das knöcherne Cranium tritt. In beiden Fällen werden knöcherne Elemente zur Bildung der Schädelkapsel herangezogen. Ihrer Natur nach können diese Knochen nun sein: $\alpha\alpha$) knorpelig präformiert, sogenannte „Ersatzknochen", oder $\beta\beta$) sofort knöchern angelegt und auf das Hautskelett zurückführbar, sogenannte „Deckknochen".

Zu $\alpha\alpha$). Es lassen sich entsprechend den

4. Nasenkapselknochen, Ethmoidalia (und zwar Mesethmoid — Exethmoidea).

Vom knorpeligen Splanchnocranium verknöchert ein Stück, das Os quadratum (Quadratbein). Vom Mandibulare aus entsteht das Articulare. Auch vom Hyobranchialskelett können Stücke verknöchern.

Zu $\beta\beta$). Besonders 3 Paar Knochen sind sehr konstant, es sind: die paarigen Nasenbeine (Nasalia), Stirnbeine (Frontalia), Scheitelbeine (Parietalia). — Weiter, um nur die wichtigsten zu nennen, in der Ohrgegend das Schuppenbein (Squamosum); an der Schädelbasis findet sich ein unpaarer großer Knochen bei niederen Vertebraten, das Parasphenoid. Im Bereich des Visceralskeletts findet man das Os intermaxillare (Zwischenkiefer) und Os maxillare (Oberkiefer), beide mit Zähnen. Am Palatoquadra-

tum hat man 2 Regionen, die vordere, die sogenannte Palatinspange, sie schwindet und nur ihre Belegknochen erhalten sich (Vomer [Pflugscharbein], Palatinum [Gaumenbein] und Pterygoid [Flügelbein]). Die hintere Region wird zum Quadratum selbst. – Auf das Mandibulare legt sich das zahntragende Dentale als Antagonist zu den zahntragenden Intermaxillare und Maxillare. Die Topographie der Schädelknochen ist hier nur in großen Zügen geschildert. Auch ist es für manche Knochen noch unsicher, ob sie Deck- oder Ersatzknochen sind, z. B. das Jugale, Postfrontale (Fig. 64; 65; 66 zusammen betrachten und vergleichen!).

7b) Cyclostomen. Bei ihnen steht das Schädelskelett auf einer sehr primitiven

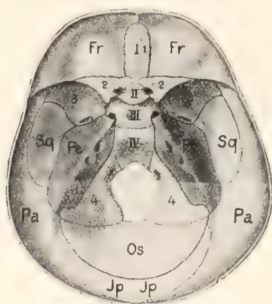


Fig. 66. Schädelbasis eines Neugeborenen. Nach Entfernen des Schädeldaches von innen gesehen. Schematisiert. I Mesethmoid, II Praesphenoidea, III Basisphenoidea, IV Basioccipitale, 1 Exethmoidea, 2 Orbitosphenoidea, 3 Alisphenoidea, 4 Exoccipitalia, Sq Squamosum, Pe Petrosum, Pa Parietale, Os Supraoccipitale, Ip Interparietale (nur bei Säugern vorhanden). Nach R. Hertwig.

Stufe. Vor allen anderen Vertebraten sind die Cyclostomen durch das Fehlen von echten Kieferbildungen charakterisiert, man bezeichnet sie deshalb als Agnatha oder Agnathostomen. Die Schädelkapsel ist nur ventral und lateral knorpelig, dorsal häutig, Knochen fehlen gänzlich. Die Hinterhauptregion fehlt. Gut erhalten sind Chorda, Parachordalia und Trabekel, die Ohr- und Nasenkapsel. Von der Basalplatte aus gehen paarige Knorpelspangen, die man als Palatoquadratum und Hyoid bezeichnet — ob sie aber den gleichnamigen Stücken der Gnathostomen entsprechen, ist unsicher.

Der runde, mit Hornzähnen versehene Saugmund wird durch ein System von Knorpelstücken gestützt, die zum Schädel in keine Beziehung treten. Ein großes Knorpelstück, der sogenannte „Zungenknorpel", liegt ventral in der Mundregion. Die Kiemenbogen sind durch eine Copula ventral, durch Querspangen lateral verbunden.

7c) Selachier. Das Neurocranium stellt hier eine einheitliche knorpelige, vielfach aus verkalktem Knorpel bestehende Kapsel dar, an der sich 4 Regionen unterscheiden lassen. Die Nasenkapsel trägt einen Fortsatz, das Rostrum. Die Augenregion ist groß. Ein Post- resp. Antorbitalfortsatz ist vielfach vorhanden. Die Ohrkapsel ist groß und an sie schließt sich das Hinterhaupt, in das Wirbel mit eingeschmolzen sind, an.

Das Visceralskelett besteht aus 2 stark bezahnten Kieferbogen. Den ersten stellen dar: Palatoquadrat und Mandibulare, den zweiten Hyoid und Hyomandibulare, letzteres sitzt an der Ohrkapsel. Kiemenbogen sind meist 5 vorhanden (Heptanchus 7), die in verschiedene Teile gegliedert sind und die Kiemenstrahlen (Radien s. Radii branchiostegi) tragen. Ventral liegt die unpaare Copula. — Bei den Holocephalen ist das Palatoquadratum mit dem Neurocranium fest verwachsen, auch geht bei ihnen vom Hyomandibulare aus eine Hautfalte über die Kiemenöffnungen; es ist die erste Anlage des Kiemendeckel-(Opercular)apparates (Fig. 67).

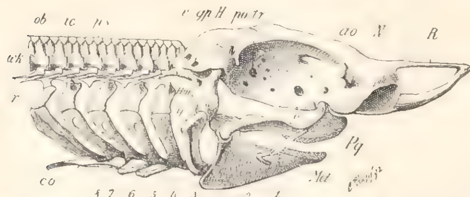


Fig. 67. Schädel und Visceralskelett eines Haies (Mustelus). wk Wirbelkörper, r Rippen, ob obere Bögen, ic Intercalaria, ps Processus spinosi, Schädel, v Vagus-, gp Glossopharyngeus-, tr Trigeminus-, o Opticusloch, po Postorbital-, ao Antorbitalfortsatz, H Hor-, N Nasenkapsel, R Rostrum, 1 bis 8 Visceralbögen, 1 Lippen-, 2 Kiefer-, 3 Zungenbeinbogen, Pq Palatoquadrat, Md Mandibulare, Hym Hyomandibulare, H Hyoid, 3 bis 8 Kiemenbogen, co Copula. Nach R. Hertwig.

7d) Ganoiden. Die Knorpelganoiden schließen sich im Bau des Chondrocraniums eng an die vorige Gruppe an. Als Besonderheit kommt aber hinzu, daß der Schädel im cranialen wie visceralen Teil mit Deckknochen (Hautknochen) überlagert wird,

die bei den höheren Vertebraten dann immer wieder entsprechend gelagert auftreten. Sehr gut ist dieser Vorgang bei den Stören zu beobachten. Wir finden Occipitalia, Parietalia, Frontalia, Nasalia (Fig. 68). — Für

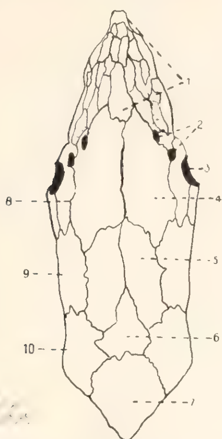


Fig. 68. Acipenser sturio. Die Knochenplatten des Schädels. Von oben. 1 Rostralia, 2 Nasenöffnungen, 3 Auge, 4 Frontale, 5 Parietale, 6 Occipitale superius, 7 Nuchale, 8 Postfrontale, 9 Squamosum, 10 Occipitale laterale. Nach Schimkewitsch. Verändert.

die Rostralia und Nuchalia findet man bei höheren Formen keine entsprechenden Knochen. Im visceralen Teil treten gleichfalls Deckknochen auf, die die anschließenden Gruppen ebenfalls beibehalten, ja noch stärker entwickeln. Die Schädelbasis nimmt das unpaare, sehr lange Parasphenoid ein. Palatoquadrat und Mandibulare vertreten noch die Kiefer, aber mit einem wichtigen Unterschied gegen die Selachier. Es wird nämlich das Palatoquadrat nicht mehr vom Schädel, sondern nur von einem Fortsatz des Hyomandibulare (das mit dem Schädel verbunden ist), dem Symplecticum, getragen. Als Deckknochen findet man in dem 1. Kieferbogen oben Palatinum, Maxillare, Pterygoid, Quadratum; unten das Dentale auf dem Mandibulare. Das Hyoid = Hyale (ebenfalls mit Deckknochen) stellt eine Verbindung zur Copula her. Die Gelenkung bildet ein hinterer Fortsatz des Mandibulare, das Articulare.

7e) Dipnoer. Ihr Schädel zeigt einige Merkwürdigkeiten, das Palatoquadratum ist mit dem Knorpelcranium (das ausgedehnt erhalten bleibt) verwachsen (sogenannte Autostylie), ähnlich wie es schon bei den Holocephalen gefunden wurde. Der Unterkiefer ist so direkt am Schädel eingelenkt, zumal das Hyomandibulare fast rudimentär ist. In die Hinterhauptregion sind Wirbel sehr deutlich erkennbar miteingeschmolzen, die sogar noch Rippen (Kopfrippen) tragen. Der Schädelbau leitet in mancher Hinsicht bereits zu dem der Amphibien hinüber.

7f) Holostei und Teleostei. Beide Gruppen zeigen vielerlei Aehnlichkeiten im Schädelbau. Einmal tritt hier das Primordialcranium mehr und mehr zurück, ferner kommt es zur Entwickelung von sehr viel Knochen (Ersatz- und Deckknochen) in der cranialen und visceralen Region, so daß die Schädelskelette dieser Gruppen mit zu den knochenreichsten überhaupt gehören. Andererseits ist der Schädelbau eigene Wege gegangen, so daß es nicht möglich ist, die Amphibien hieran direkt anzuschließen. Die Augen sind bei den Teleostei meist stark entwickelt und die Schädelhöhle wird infolgedessen an dieser Stelle stark reduziert auf ein schmales Septum interorbitale. Von Ersatzknochen finden wir nachfolgende. In der Occipitalregion zwei Pleurooccipitalia oder Occipitalia lateralia, ein Basi- und Supraoccipitale, diese vier umgeben das Foramen magnum (Hinterhauptsloch). In der Labyrinthregion finden wir Opisthoticum, (seu Intercalare auch als Deckknochen gedeutet), nach vorn Prooticum (Petrosum), Sphenoticum (Postfrontale) und Epioticum und Pteroticum (Squamosum). Letzteres ist seiner Natur nach nicht sicher. Bei Salmo wurde es als Mischknochen erkannt. In der Sphenoidalregion findet man das Basiphenoid, Alisphenoide und Orbitosphenoide. Die Ethmoidalregion zeigt Reste von Knorpel und als Ersatzknochen findet man die Pleuroethmoidea (s. Ethmoidalia lateralia oder Präfrontalia) und das unpaare Mesethmoid.

Von Deckknochen haben wir das große unpaare Parasphenoid an der Schädelbasis. Vorn schließt sich an bei Teleosteern ein unpaarer, bei den Holostei ein paariger Vomer oder Pflugscharbein. Die Schädeldecke ergänzt sich durch Parietalia, Frontalia und Nasalia. Besonders in der Orbitalregion finden sich mannigfache Abweichungen in den Gruppen, es treten vielerlei Knochen auf (z. B. Post- und Infraorbitalia) (Fig. 69).

Auch im Visceralskelett gehen Umwandlungen vor sich. Einmal treten auch Ersatz- und Deckknochen auf, dann aber wird die Art der Gelenkung des Unterkiefers eine andere. In der Palatoquadratregion finden wir von vorn beginnend: Prämaxillare (bezahnt), Maxillare, Ento-, Ekto-, Metapterygoid (Ersatzknochen), das Palatinum (Mischknochen). Das große Hyomandibulare

(Ersatzknochen) ist in der Labyrinthregion am Schädel eingelenkt, es trägt durch Vermittlung des Symplecticums und Quadratums den Unterkiefer und wird so zum sogenannten Kieferstiel (Hyostylie). Das ebenfalls am Hyomandibulare sitzende Stylohyale stellt die Verbindung zum Hyale (Hyoid) her. Das Hyale gliedert sich in Hypo-, Basi-, Uro-, Cerato-, Epihyale. Am Mandibulare finden wir als Deckknochen das bezahnte Dentale, dahinter das Articulare. das mit dem Quadratum eingelenkt ist und das kleine Angulare (Fig. 70, A und B).

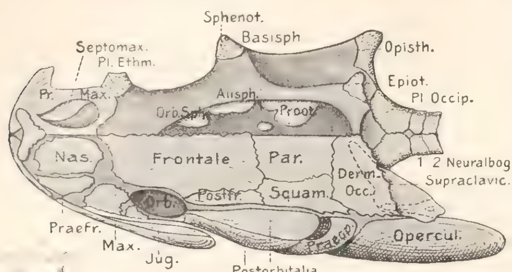


Fig. 69. Amia calva (Holostei). Schädel von der Dorsalseite. Die rechte Hälfte der Deckknochen entfernt außer dem Prämaxillare. Knorpel dunkel, Ersatzknochen punktiert, Deckknochen hell. Bezeichnungen durch den Text verständlich. Nach Bütschli.

Reich ist der Opercular- (Kiemendeckel) apparat entwickelt, der sich an den caudalen Hyomandibularfortsatz anschließt. Wir haben gewöhnlich Operculum und Prä-, Inter-, Suboperculum. Am Hyale sitzen die Radii branchiostegi. Die Kiemenbogen 1 bis 4 sind gut entwickelt. Der 5. Bogen ist zu den unteren Schlundknochen

Fig. 70. Schädelskelett eines Teleosteers, Gadus morrhua. Schädel und Visceralskelett mit Schultergürtel. Von links. Ang Angulare. Scap Scapula, sonstige Bezeichnung durch Text gegeben. Epih Epihyale, Styloh Stylohyale, Epibr Epibranchiale, Os. phar. inf. (sup.) Ossa pharyngea inferiora (superiora). Nach Bütschli.

(Ossa pharyngea inferiora) vielfach umgebildet. Die oberen Schlundknochen (Ossa pharyngea superiora) bilden Teile der Bogen 1 bis 4.

7g) Amphibien. Die Schädelskelette sind noch ziemlich primitiv und zeigen manche den niederen Fischen und Dipnoern zukommende Eigentümlichkeiten. Das Primordialcranium ist zum Teil erhalten; verhältnismäßig wenig Ersatzknochen treten auf. In dieser Gruppe vollzieht sich ja der Uebergang vom Wasser- zum Landleben und damit treten Besonderheiten in der Umänderung und im Funktionswechsel der Skelettelemente auf, die höchst wichtig sind. — Charakteristisch für die Amphibien ist das Fehlen des Symplecticums und des Hyomandibulare. Dafür sind in der Ohrregion wichtige Umwandlungen eingetreten. Das Spritzloch der Selachier wird zu einem Luftkanal, das eine Ende mündet in die Mundhöhle (Tuba Eustachii). Das andere Ende wird durch das Trommelfell geschlossen, welches in dem Annulus tympanicus (einen knöchernen oder Knorpelring) ausgespannt ist. Ferner tritt eine Knochenplatte, das Operculum auf (nicht mit dem Operculum der Fische zu verwechseln), die die Fenestra ovalis, den Zugang zum Labyrinth im Petrosum, verschließt. Zwischen Trommelfell und Fenestra ovalis vermittelt ein stabförmiger Knochen, die Columella, die Schwingungen (Fig. 71, A und B).

Ob das Operculum = Hyomandibulare; Columella = Symplecticum der Fische ist für die Amphibien nicht erwiesen; für die Sauropsida scheint es aber nach embryologischen Befunden der Fall zu sein.

An Ersatzknochen finden wir: die Occipitalregion hat nur paarige Occipitalia lateralia (= Pleurooccipitalia) — dies ist wichtig zur Unterscheidung von Reptilien —, welche jeder einen Condylus haben für den 1. Halswirbel (Atlas). Die Amphibien sind also Dicondylier. In der Ohrregion liegt das ansehnliche Prooticum (auch Petrosum) mit der Fenestra ovalis. — Deckknochen sind reichlich vorhanden. Von vorn beginnend finden wir Nasalia, Frontalia, Parietalia. — Bei Anuren verwachsen die beiden letzteren zum einheitlichen Frontoparietale.

Bei den † Stegocephalen liegt in der Mitte der Parietalia eine Oeffnung, das Foramen parietale, für das unpaare Stirnauge. Die Urodelen besitzen auch noch Orbitosphenoidalia, während bei den Anuren noch ein Ringknochen, das Gürtelbein (Os en ceinture [Cuvier] = Sphenethmoid) auftritt. — Die Schädelbasis bildet das Vomer (vielfach zahntragend), Palatinum und das unpaare Parasphenoid. Den Oberkiefer bilden Prämaxillare und Maxillare, eventuell mit Zähnen. An das Maxillare schließt sich bei Anuren das Quadrato- maxillare (= Quadrato-jugale) an, zum Quadratum hinüberreichend und den unteren Jochbogen bildend. Das Quadrat verknöchert verschieden stark und von ihm aus gehen nach

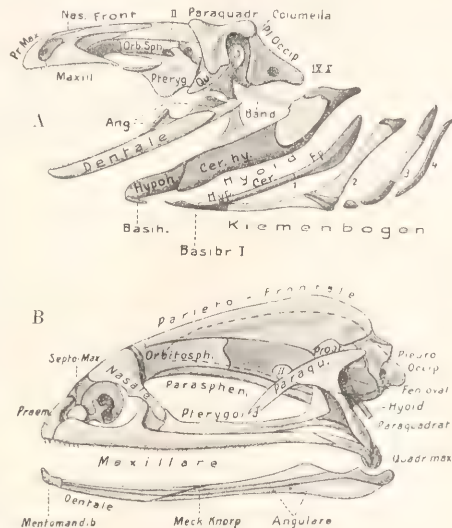


Fig. 71. A Schädelskelett von einem Urodelen (Menopoma allegh aniense). Von links. II, IX, X Austrittsstelle der entsprechenden Nerven. B Schädelskelett eines Anuren (Rana fusca). Von links. Die Ausdehnung der Schädelhöhle ist punktiert. Nach Bütschli.

vorn die bei den Anuren großen Pterygoidea. Ueber dem Quadrat liegt ein Deckknochen, das Paraquadratum (auch Squamosum genannt). Der Unterkiefer besteht aus Dentale mit Zähnen und dem gelenktragenden Angulare.

Das Hyobranchialskelett wird bei Anuren im erwachsenen Zustande stark reduziert. Im Larvenleben sind Hyoid, Copula und 4 Bogen vorhanden. Es verschmelzen dann die Ventralenden mit der Copula zu einer

unpaaren Platte, dem Zungenbeinkörper, der nach hinten zu noch Kiemenbogenreste, nach vorn Fortsätze, die Zungenbeinbogen (das umgebildete Hyoid), trägt. Bei Urodelen und Gymnophionen erhält sich das Hyobranchialskelett in viel größerem Umfange.

7h) Reptilien. Der Schädel aller Amniota, zu denen die folgenden Gruppen zählen, zeigt verschiedene typische Merkmale. Einmal tritt das Parasphenoid sehr zurück und seine Reste vereinigen sich mit dem Basisphenoid. Ferner sind Reste von 3 Wirbeln zur Occipitalregion völlig miteingeschmolzen worden, was aus dem Verhalten der Nerven zu erschließen ist. — Am Reptilienschädel tritt das Primordialcranium sehr zurück und es erhalten sich nur Teile davon in der Nasengegend. Die Verbindung mit dem Atlas vermittelt ein unpaarer Condylus occipitalis. Reptilien sind Monocondylier. Am Hinterhaupt treten vier Knochenstücke auf, die sich jedoch nicht immer an der Bildung des Foramen magnum beteiligen (z. B. Schlangen). Am Ohr finden wir noch eine Fenestra rotunda neben der Fenestra ovalis. Außerdem kommt zum Ohr noch der obere Teil vom Hyoidbogen mit einem kleinen Knochen, dem Stapes (Steigbügel), dessen Platte die Fenestra ovalis schließt. Er entspricht wohl (Versluys) der Columella und dem Operculum der Amphibien.

In der Augenregion ist der tropibasische Schädel zum schmalen Septum interorbitale zusammengedrängt. Das Schädeldach ist gut entwickelt, bei den Rhynchocephalen sind die Parietalia verwachsen und umschließen das Foramen parietale für das Stirnauge. Bei Sauriern und Krokodilen begrenzt den vorderen Augenrand ein Lacrymale.

Der Kiefergaumenapparat zeigt einen äußeren Bogen, dargestellt durch Prämaxillare, Maxillare, beide mit Zähnen, Jugale und Paraquadratum; einen inneren aus Vomer, Pterygoid, Palatinum und Quadratum. — Ein typischer querliegender Knochen ist das vom Maxillare zum Pterygoid reichende Transversum. Das Squamosum (= Supratemporale) liegt direkt am Schädel. Das Quadratum ist sehr kräftig und trägt immer den bezahnten Unterkiefer (Fig. 72).

Bei Rhynchocephalen, Cheloniern und Krokodilen ist das Quadratum und der Kiefergaumenapparat fest am Schädel befestigt, während bei Sauriern und im höchsten Grade bei Ophidiern der Aufhängeteil des Unterkiefers beweglich ist. Die Saurier zeigen einen reduzierten Jochbogen, den Schlangen fehlt er ganz. Vielfach tritt hier ein stabförmiger Knochen, die Columella cranii, auf, zwischen den Parietalia und Pterygoidea.

Der Unterkiefer besteht stets aus mehreren

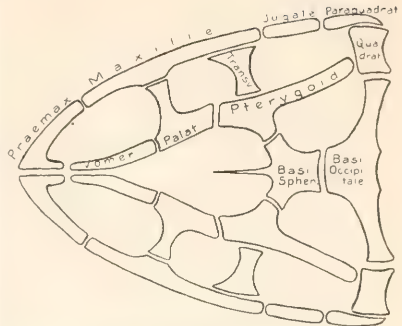


Fig. 72. Kiefergaumenapparat der Sauropsiden. In Ventralansicht. Nach Bütschli.

Stücken, von vorn nach hinten: aus den zahntragenden Dentalia, die durch Naht, Knorpel, bei Ophidiern durch ein sehr elastisches Band verbunden sind, dann folgt jederseits ein Operculare, Angulare und Articulare, das die Gelenkfläche mit dem Quadratum bildet. Es können noch einige kleine Knochen hinzukommen. Das Visceralskelett ist in seinen hinteren Bogenpaaren als Zungenbein (Reste der Copula) mit Hörnern vorhanden; aber sehr reduziert bei Ophidiern (Fig. 73).

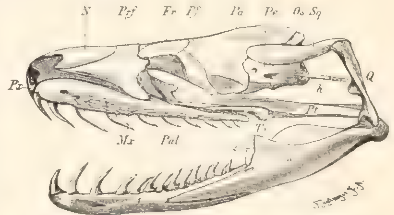


Fig. 73. Schädel einer Schlange (Boa constrictor). Von der Seite. Px Prämaxillare, N Nasale, Prf Prä-, Pf Postfrontale, Fr Frontale, Pa Parietale, Pe Petrosum, Os Supraoccipitale, Sq Squamosum, h Hörknöchelchen, Q Quadratum, Pt Pterygoid, Tr Transversum, Pal Palatinum, Mx Maxillare, 1 Dentale, 2 Angulare, 3 Articulare. Nach Boas.

7i) Vögel. Im Bauplan zeigt der Schädel der Vögel viel Aehnlichkeit mit dem der Saurier. Er besitzt nur einen unpaaren, mehr nach unten gerichteten Condylus occipitalis, welchen die Occipitalia lateralia und das Basioccipitale bilden. Der Schädel ist tropibasisch und die Augenhöhlen durch das Interorbitalseptum (auch

Ethmoideum genannt) getrennt. Typisch ist das Schwinden des Knorpelcraniums und das frühe Verschmelzen der sehr leichten, spongiös gebauten sogenannten pneumatischen Knochen. Das Neurocranium ist sehr voluminös und im erwachsenen Zustande eine Kapsel, die im wesentlichen die verschmolzenen Occipitalia, Squamosum, Felsenbein (Pro-, Epi-, Opisthoticum) bilden (Fig. 74).

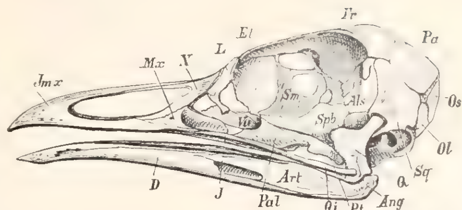


Fig. 74. Schädel eines Vogels (junge Trappe). Von der Seite. Imx Prae-, Mx Maxillare, N Nasale, L Lacrymale — Präfrontale, Et Mesethmoid, Fr Frontale, Pa Parietale, Os Supra-, Ol Exoccipitale, Sq Squamosum, Q Quadratum, Als Ali-, Spb Basi- und Präsphenoid, Sm Septum interorbitale, Ang Angulare, Pt Pterygoid, Qj Quadratojugale, Art Articulare, Pal Palatinum, J Jugale, D Dentale. Nach R. Hertwig.

Postfrontalia, Transversum und Columellare cranii fehlen. Typisch für den Vogelkopf ist ferner die Bewegungsmöglichkeit des Oberschnabels, den in der Hauptsache die großen Prämaxillaria bilden. Dazu kommen noch Maxillaria und Nasalia, letztere beweglich gegen die Präfrontalia (auch als Lacrymalia gedeutet) abgesetzt. Das Quadratum ist beweglich am Schädel. Die Verbindung von diesem zum Maxillare stellen her Pterygoid, Palatinum einerseits, Quadratojugale und Jugale (zusammen als Jochbogen) andererseits. Den Mechanismus der Bewegung zeigt Figur 75. Der Unterkiefer besteht aus mehreren Knochen, (Dentale, Articulare, Angulare) und artikuliert am Quadratum. Das Dentale = Mandibulare ist verwachsen und trägt wie der Oberschnabel hornige Scheiden, nie Zähne bei rezenten Vögeln. — Vom Hyobranchialskelett bleiben Teile erhalten und bilden das mannigfach gestaltete Zungenbein, das aus dem vorderen Os entoglossum, dem Zungenbeinkörper und den Zungenbeinhörnern besteht.

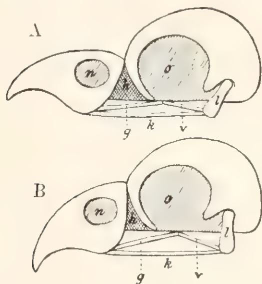


Fig. 75. Schema der Bewegung des Oberschnabels bei den Vögeln. g Palatinum, v Pterygoid, k Jugale und Quadratojugale, n Nasenscheidewand und h häutiger Teil derselben, o Septum interorbitale, l Quadratum. Nach Boas.

7k) Säugetiere. Der im Knorpelstadium mehr tropibasische, im erwachsenen Zustand platybasische Schädel zeigt charakteristische Merkmale. Einmal hat er 2 Condyli, die von den Pleurooccipitalia gebildet werden, ferner ist das Quadratum nicht mehr Träger des Unterkiefers, sondern das Squamosum.

Transversum, Columellare cranii und Postfrontale fehlen, das Paraquadratum wurde wahrscheinlich zum Tympanicum. Die Schädelkapsel wird sehr voluminös und das nach der Nasenhöhle zu abschließende Ethmoid erscheint weit nach vorn verschoben. Die Knochen sind durch Naht, Sutur, verbunden oder verwachsen vollkommen. Das Foramen magnum ist besonders bei Primaten nach unten verschoben, der Schädelboden wird steiler und steigt nach vorn an. Im Zusammenhang damit steht ein Zusammenschieben der Gesichtsknochen zum eigentlichen Gesichtsschädel (Facies), der den höchsten Grad der Ausbildung bei Primaten erreicht. In der Hinterhauptsregion findet man 4 Knochen, die meist verwachsen zum Hinterhauptsbein. Die Pleurooccipitalia zeigen vielfach einen seitlichen Fortsatz, den Processus paramastoideus. In der Keilbeinregion findet sich ein unpaares Basisphenoid (mit einer dorsalen Erhebung der Sella turcica) und Präsphenoid. Daran anschließend die paarigen Ali- und Orbitosphenoide (Alae magnae et parvae der menschliche Anatomie). Am Schädeldach trifft man Parietalia und zwischen diesen und über dem Supraoccipitale die nur Säugern zukommenden Interparietalia (vgl. Fig. 66).

Die Frontalia tragen bei den gehörnten Wiederkäuern die Knochenstützen der hohlen Hornscheiden und bei den Hirschen die „Rosenstöcke“ für die Knochengeweihe,

die sich jährlich erneuern. Bei der Geburt sind die Schädeldachknochen nicht gleich völlig ausgebildet, sondern lassen gewisse Stellen frei (Fontanellenbildung).

Die Ohrregion umfaßt das Felsenbein = Os petrosum oder Perioticum mit dem Labyrinth, das Paukenbein oder Tympanicum, welches aus dem Paraquadratum hervorgeht, und das Squamosum. Dieses trägt die Unterkiefergelenkfläche und sendet nach vorn zur Bildung des Jochbogens den Processus zygomaticus. Das Tympanicum umschließt das Trommelfell und die Paukenhöhle, die bisweilen groß hervortritt als sogenannte Bulla ossea. Das Quadratum wurde zum Ambos (Incus), das Articulare zum Hammer (Malleus); beide treten also in den Dienst des Gehörorgans. Als dritten Gehörknochen finden wir den Steigbügel (Stapes), dessen Platte die Fenestra ovalis schließt (vgl. 7g; 7h). Bei nur wenigen Säugern verwächst wie beim Menschen das Squamosum mit dem Tympano-Perioticum zum einheitlichen Os temporale (Schläfenbein) (Fig. 76).

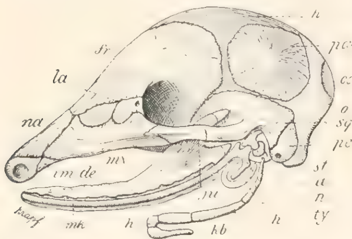


Fig. 76. Schädelskelett eines Sängers (Tatusia hybrida juv.). Knorpeliges Primordialkranium punktiert, häutiges schraffiert (h). 1. Belegknochen: na Nasale, davor Nasenkapsel, la Lacrymale, fr Frontale, pa Parietale, im Intermaxillare, mx Maxillare, ju Jugale, sq Squamosum, de Dentale; 2. Knorpel und primäre Knochen: os Occipitale superius, o Occipitalknorpel, pe Petrosum, a Ambos (Quadratum), u Hammer (Articulare), mk Meckelscher Knorpel, st Steigbügel (Hyomandibulare), h Zungenbeinbogen, kb Reste der Kiemenbögen, ty Tympanicum. Nach R. Hertwig.

In der Nasenregion bildet das Siebbein (Ethmoid) den Abschluß nach der Schädelhöhle zu. Die seitlichen Teile, Lamina cribrosa, sind durchbohrt. In der Nasenhöhle finden sich siebartige Verknöcherungen, die Ethmoturbinalia, sie bilden das „Siebbeinlabyrinth". Die Nasalia sind außer bei Waltieren gut entwickelt. Ob Präfrontalia vorkommen, ist unsicher, dafür findet man die Lacrymalia.

Im Kiefergaumenapparat trifft man das Prämaxillare (bezahnt), bei Chiropteren rudimentär. Die bezahnten Maxillaria sind groß und bilden anteilig den knöchernen Gaumen. Das Jugale schließt sich daran an und begrenzt unten den Augenring. Palatina, Vomer und Pterygoidea sind vorhanden. Den Jochbogen bildet vornehmlich das Jugale oder Zygomaticum zwischen Maxillare und Processus zygomaticus vom Squamosum aus. Der Unterkiefer (Mandibulare), bezahnt, ist einheitlich vorn verwachsen oder durch Symphyse verbunden. Bei den Primaten bildet er vorn den Kinnvorsprung (Mentum). Der hintere Ast steigt stark an und zeigt 2 Fortsätze, den vorderen Processus coronoideus (als Ansatz für den Temporalmuskel) und den hinteren Processus condyloideus mit den Gelenkflächen. Der Unterkiefer der Säuger entspricht also eigentlich nicht dem der anderen Vertebraten, sondern nur dem vorderen Teil desselben. Vom Hyobranchialskelett bleiben Teile erhalten und geben das Zungenbein und das Kehlkopfskelett. Beim Menschen unterscheidet man am Kehlkopfskelett den Schildknorpel (Cartilago thyreoidea), den Ringknorpel (Cartilago cricoidea) und die Aryknorpel (Cartilago arytaenoideae).

Anhangsweise seien hier noch die Zähne erwähnt, die in ihrer Gesamtheit das Gebiß bilden und in größter Mannigfaltigkeit der Ausbildung auftreten können. Sind alle Zähne gleich gestaltet, so nennt man das Gebiß homodont, z. B. Fische, sind sie verschieden ausgebildet heterodont, z. B. Säuger. — Je nach ihrer Stellung unterscheidet man Schneide-, Eck-, Backenzähne (Dentes incisivi, canini, molares). Ihrer Genese nach sind die Zähne von den Placoidschuppen, d. h. Hautverknöcherungen, herzuleiten, wenn sie auch später in den Knochenalveolen der Kiefer befestigt sind.

Literatur. *Von der überaus zahlreichen Literatur seien nur wenige Werke angeführt und zwar solche, in denen sich ganz ausführliche Quellennachweise finden:* **Boutan**, *Zoologie descriptive. Paris 1900.* — **H. G. Bronn**, *Klassen und Ordnungen des Tierreichs. Versch. Bde. z. T. noch im Erscheinen. Leipzig 1880 bis 1913.* — **Bütschli**, *Vorlesungen über vergleichende Anatomie. 1./2. Lief. kompl Leipzig 1910/13.* — *Challenger Reports, 1880/95.* — **Claus-Grobben**, *Lehrbuch der Zoologie, 8. Aufl. Marburg 1910.* — **Delage und Hérouard**, *Traité de Zoologie concrète. Paris 1896/1910.* — **Doflein**, *Lehrbuch der Protozoenkunde, 3. Aufl. 1911.* — **Gegenbaur**, *Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere unter Berücksichtigung der Wirbellosen. Leipzig 1898.* — **Derselbe**, *Lehrbuch der Anatomie des Menschen, 7. Aufl. Leipzig 1903.* — **E. S. Goodrich**, *Cyclostomes and Fishes. London 1909.* — **O. Hertwig**, *Handbuch der Entwickelungslehre der Wirbeltiere. Jena 1906.* — **Harmer und Shipley**, *The Cambridge Natural History, Bd.* 1 *bis* 10. *London 1909.* — **Schimkewitsch**, *Lehrbuch der vergleichenden Anatomie der Wirbeltiere. Stuttgart*

1910. — **K. C. Schneider,** *Lehrbuch der vergleichenden Histologie der Tiere. Jena 1902.* — **Stromer v. Reichenbach,** *Lehrbuch der Paläozoologie. Leipzig 1909.* — **Vogt und Yung,** *Lehrbuch der praktischen vergleichenden Anatomie. Braunschweig 1888.* — **Weber,** *Die Säugetiere. Jena 1904.* — **Wiedersheim,** *Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere, 7. Aufl. Jena 1909.* — **Zittel,** *Handbuch der Paläontologie. Leipzig 1880. Neubearbeitet v. Broili. München 1910.*

A. Hase.

Skraup

Zdenko Hans.

Geboren am 3. März 1850 in Prag, gestorben am 10. November 1910 in Wien, wo er seine an wissenschaftlichen Erfolgen reiche akademische Laufbahn als Professor der Chemie an der Universität (seit 1906) beschloß, nachdem er sie als Assistent und Dozent in Prag und Wien begonnen, in Graz 1886, zuerst an der Technischen Hochschule, dann an der Universität fortgesetzt hatte, gehört Skraup zu den hervorragendsten Chemikern Oesterreichs. Als anregender Lehrer hat er höchst erfolgreich gewirkt, als Forscher bleibende Werte geschaffen. Den Chemikern ist er besonders durch seine Chinolinsynthese aus Anilin und Glycerin bekannt geworden; diese von ihm gefundene Methode erwies sich der größten Ausdehnung fähig. Durch seine Arbeiten über China-Alkaloide, besonders durch Untersuchung wichtiger Abbauprodukte derselben trug er zur Klärung ihrer Konstitution erheblich bei. Ebenso originell waren seine Untersuchungen im Gebiete der Kohlehydrate und Eiweißstoffe. Ueber sein frisches Wesen und nachhaltiges Wirken gibt ein von H. Schrötter geschriebener Nekrolog, (Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft **43**, 3683) besten Aufschluß.

E. von Meyer.

Smith

William.

Er wurde am 23. März 1769 zu Churchill in Oxfordshire als Sohn eines Farmers geboren, besuchte die Elementarschule und erwarb sich dann durch Selbststudium so viel Kenntnisse in der Geometrie, daß er mit 18 Jahren bei einem Feldmesser als Gehilfe beschäftigt wurde. 1799 war er als Ingenieur beim Kohlenkanal in Sommerset tätig. Von 1801 bis 1819 lebte er in London; 1828 wurde er Verwalter der Güter des Sir John Johnstone. Neben seiner langjährigen Tätigkeit als Ingenieur und Feldmesser beschäftigte er sich mit geologischen Problemen und leistete als Autodidakt so Vorzügliches in dieser Wissenschaft, daß er im Jahre 1831 die erste Wollaston-Medaille erhielt. 1824 hielt er Vorlesungen in York, Hall und Sheffield; 1835 ernannte ihn die Universität Dublin zum Doctor iuris. In seinen letzten Lebensjahren gewährte ihm die Regierung eine Pension. Er starb am 28. August 1839 in Northampton.

Seine Bedeutung für die geologische Wissenschaft erhellt am besten das Beiwort „Vater der englischen Geologie". Er erkannte die Wichtigkeit der Versteinerungen für die Altersbestimmung der Schichten. Seine große, nach den Schichten Englands geordnete Fossiliensammlung wurde vom britischen Museum angekauft, wo sie noch heute aufbewahrt wird. An und für sich dem Schreiben abhold, hat er auf kartographischem Gebiete für seine Zeit Großartiges geleistet. Sein Werk: A geological Map of England and Wales with Part of Scotland; exhibiting the Colleries, Mines and Canals the Marshes and Fen Lands, originally overflowed by the sea; and the Variety of Soil, according to the Variations of the substrata etc. (London 1813 bis 1815) ist der erste Versuch, die geologischen Verhältnisse eines größeren Gebietes von Europa darzustellen. Diese berühmte Karte, die aus 15 Blättern besteht, war bestimmend für die Formationskunde Englands. 1819 bis 1824 gab er 21 geognostische Karten der englischen Grafschaften heraus. Weiter erschien von ihm: Strata identified by organized fossils (London 1815); Stratigraphical system of organized fossils containing prints of the most caracteristic specimens in each stratum (London 1817).

Literatur. **J. Phillips,** *Memoirs of William Smith, London 1844.* — *Biographie v. W. Smith in Sedgwick's Presidential Adress. Proceed. Geol. Soc., S. 279, London 1831.* — *Dictionary of National Biography, Vol.* **53**, *S. 151 bis 153.*

O. Marschall.

Snell (Snellius van Roijen)

Willebrord.

Geboren 1591 in Leyden, gestorben ebenda am 30. Oktober 1626. Er war der Sohn des Professors der Mathematik Rudolph Snell in Leyden, dessen Nachfolger er 1613 wurde. 1615 entdeckte er das Brechungsgesetz des Lichts; er veröffentlichte die betreffende Schrift niemals, Huygens und Isaac Voß bezeugen indessen, dieselbe gesehen zu haben. In den Jahren 1615 bis 1617 vollendete er die Messung der Erdoberfläche, indem er zum erstenmal die Methode der Triangulation anwandte.

E. Drude.

Sohnke

Leonhard.

Geboren am 22. Februar 1842 in Halle a. S., gestorben am 2. November 1897 in München. Er war ein Sohn des Mathematikers Professor Ludwig Adolf Sohnke in Halle, wurde zunächst Lehrer am Friedrichs-Kollegium, 1869

Privatdozent in Königsberg, 1871 Professor am Polytechnikum in Karlsruhe und Vorstand des dortigen meteorologischen Observatoriums, hierauf Professor in Jena, 1888 Professor der Physik am Polytechnikum in München. Sohnke hat die theoretische Physik, speziell die Kristalloptik um schöne Versuche und grundlegende Theorien bereichert. 1878 veröffentlichte er eine Arbeit über Drehung der Polarisationsebene und den Temperatureinfluß, 1879 eine Theorie der Kristalle. Gemeinsam mit Wangerin unternahm er Versuche über die Newtonschen Ringe und gab mit ihm eine Theorie derselben. In späteren Jahren wendete er sein lebhaftes Interesse den wissenschaftlichen Luftfahrten zu.

Literatur. *Nekrolog von* **C. Voit.** *Münchn. Akad. S. B.* 28.

E. Drude.

Soleil

Jean Baptiste François.

Geboren 1798 in Paris, gestorben ebenda am 17. November 1878, lebte von 1832 bis 1849 als Optiker in Paris. Er veröffentlichte Untersuchungen über Polarisation und konstruierte 1847 ein Sacharimeter mit Quarzdoppelplatte.

E. Drude.

Solenoconchen,

Scaphopoden, eine der Hauptgruppen der Weichtiere, die nur aus verhältnismäßig wenigen, im Meer lebenden, aber durch eine charakteristische Organisation ausgezeichneten Arten besteht (vgl. den Artikel „Scaphopoda").

Solfataren.

Vulkane, die ihre Tätigkeit auf das Aushauchen von (schwefelhaltigen) Gasen beschränken, bezeichnet man als Solfataren (vgl. den Artikel „Vulkanismus").

Sölle

= Pfuhle heißen die flachen Ausstrudelungsseen in Glaziallandschaften z. B. in der norddeutschen Tiefebene.

Sömmering

Samuel Thomas.

Geboren am 28. Januar 1755 in Thorn, gestorben am 2. März 1830 in Frankfurt a. M. Er studierte seit 1774 in Göttingen, wurde 1779 zum Professor der Chirurgie und Anatomie am Carolineum zu Kassel ernannt, ging 1784 als Professor der Medizin nach Mainz, 1795 als praktischer Arzt nach Frankfurt a. M., 1804 als königlischer Leibarzt nach München. Dort wurde er zum Mitglied der Akademie der Wissenschaften ernannt und erhielt den Adel, 1820 kehrte er nach Frankfurt a. M. zurück und lebte dort als praktischer Arzt bis zu seinem Ende. Er konstruierte 1809 einen elektrischen Telegraphen, bei welchem die Zeichen durch die galvanische Zersetzung des Wassers gegeben werden sollten. Abhandlungen über Sonnenflecken, über die Glühlampe und zahlreiche medizinische Veröffentlichungen stammen aus seiner Feder.

Literatur. ***W. Stricker,*** *S. Th. v. S., Frankfurt a. M. 1862.* — ***Derselbe,*** *Die Erfindung des elektrischen Telegraphen. Jahresber. d. phys. Vereinigung, Frankfurt a. M. 1858.*

E. Drude.

Sonnensystem.

1. Allgemeine Uebersicht. Entfernungen. 2. Die Planeten und ihre Monde: a) Die inneren Planeten Merkur und Venus. b) Erde. c) Mars. d) Planetoiden. e) Jupiter. f) Saturn. g) Uranus und Neptun. 3. Kometen. 4. Sternschnuppen. 5. Meteoriten. 6. Gravitationsgesetz. 7. Stabilität des Systems.

1. **Allgemeine Uebersicht. Entfernungen.** Das Sonnensystem umfaßt außer der Sonne selbst die durch die Gravitationswirkung sich um sie bewegenden Himmelskörper. Es gehören ihm danach an: 1. die Sonne, 2. die acht großen Planeten Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun mit ihren Monden, 3. die zahlreichen kleinen Planeten zwischen Mars und Jupiter, 4. die Kometen, zum Teil dauernd, zum Teil vielleicht nur vorübergehend, 5. die Sternschnuppen und 6. wahrscheinlich meist nur während eines Teiles ihrer Flugbahn die Meteoriten.

Von der Sonne, den großen Planeten und deren Monden geben die folgenden zwei Tabellen die wichtigsten auf ihre Bahn und — für die ersteren — auch auf ihre Masse und Größe bezüglichen Werte. Die Bewegung der Planeten um die Sonne geschieht — von Norden aus betrachtet gedacht — entgegengesetzt der Bewegung des Uhrzeigers, in der sogenannten rechtläufigen Richtung.

Sonne und große Planeten.

Name	Zeichen	Entfernung von der Sonne in astr. Einh.	Entfernung von der Sonne in Mill. km	Umlaufszeit	Neigung gegen die Erdbahn	Masse (Sonne = 1)	Dichte (Erde = 1)	Aequatordurchmesser (Erde = 1)	Rotationszeit	Abplattung
Sonne	☉	—	—	—	—	1	0,26	109,05	27 Tage	0
Merkur	☿	0,39	58	88 Tage	7^0 0′	1:6000000	1,05	0,38	88 „(?)	0
Venus	♀	0,72	108	225 „	3 24	1:408000	0,82	1,00	23^h (?)	0
Erde	♁	1,00	149	1,00 Jahre	0 0	1:333400	1,00	1,00	$23^h 56^m 4^s$	1:297
Mars	♂	1,52	228	1,88 „	1 51	1:3093500	0,72	0,53	24 37 23	1:190
Jupiter	♃	5,20	778	11,86 „	1 19	1:1047	0,25	11,14	9 55 34	1:16
Saturn	♄	9,54	1426	29,45 „	2 30	1:3502	0,14	9,36	10 14 —	1:10
Uranus	♅	19,19	2869	84,02 „	0 46	1:22869	0,25	3,89	10 30 —?	?
Neptun	♆	30,07	4495	164,78 „	1 47	1:19314	0,31	3,82	?	?

Monde.

Name		Umlaufszeit in Tagen	Mittl. Entfernung vom Hauptplaneten in dessen Halbmessern	Neigung gegen die Erdbahn	Helligkeit in Größenklassen	Entdecker	Entdeckungsjahr
Mond der Erde		27,32	60,27	5^0	—11,8	—	-
Mars:	I Phobos	0,32	2,70	27	13 bis 14	A. Hall	1877
	II Deimos	1,26	6,74	27	13	„	1877
Jupiter:	I Jo	1,77	5,93	2	6 bis 7	Marius, Galilei	1609, 1610
	II Europa	3,55	9,44	2	6 bis 7	„	1609, 1610
	III Ganymedes	7,15	15,06	2	6	„	1609, 1610
	IV Kallisto	16,69	26,49	2	7	„	1609, 1610
	V	0,50	2,55	2	13	Barnard	1892
	VI	251	100	29	14	Perrine	1905
	VII	265	107	27	16	„	1905
	VIII	789	357	149	16 bis 17	Melotte	1908
Saturn:	I Mimas	0,94	3,07	28	12,8	W. Herschel	1789
	II Enceladus	1,37	3,94	28	12,3	„	1789
	III Tethys	1,89	4,87	29	11,3	G. D. Cassini	1684
	IV Dione	2,74	6,25	28	11,5	„	1684
	V Rhea	4,52	8,73	28	10,8	„	1672
	VI Titan	15,95	20,22	28	9,4	Huygens	1655
	VII Hyperion	21,28	24,49	27	13,7	Lassell u. Bond	1848
	VIII Japetus	79,33	58,91	18	11,7	G. D. Cassini	1671
	IX Phoebe	550,44	214,4	175	16 bis 18	W. Pickering	1898
	X Themis	20,85	24,18	39	17,5	„	1905
Uranus:	I Ariel	2,52	7,04	98	16	Lassell	1846
	II Umbriel	4,14	9,91	98	16 bis 17	„	1846
	III Titania	8,71	16,11	98	14,2	W. Herschel	1787
	IV Oberon	13,46	21,54	98	14,4	„	1787
Neptun:	Triton	5,88	14,73	143	13,8	Lassell	1846

Infolge ihrer großen Masse, welche um fast das Tausendfache die Masse aller übrigen zum System gehörenden Himmelskörper übertrifft, bestimmt die Sonne im wesentlichen allein die Bahnen der Planeten, welche bei den zwischen ihnen liegenden Abständen höchstens geringfügige Störungen aufeinander ausüben können. Ohne jeden nachweisbaren Einfluß ist die Masse der kleinen Planeten, der Kometen und Meteore. Ferner bedingt die Sonne durch ihre von den Physikern zu 5600^0 geschätzte Temperatur den physikalischen Zustand der Planeten, insbesondere ist sie durch ihre Ausstrahlung von Licht und Wärme die Quelle alles Lebens auf der Erde. Weiteres über die Sonne s. im Artikel „Physik der Sonne“.

Die Entfernung der großen Planeten von der Sonne läßt sich ziemlich gut durch die Titius-Bodesche Reihe (Titius, 1729 bis 1796, Professor der Physik in Wittenberg; Bode, 1747—1826, Direktor der Berliner Sternwarte) darstellen, nach welcher aus der gleich 4 gesetzten Entfernung des Merkur von der Sonne die Entfernungen der anderen Planeten gefunden werden, wenn man das

Dreifache der sukzessiven Potenzen von 2 hinzufügt.

Planet	Entfernung nach der Titius-Bodeschen Reihe	Wahre Entfernung
Merkur	$4 = 4$	4
Venus	$4 + 3.2^0 = 7$	7
Erde	$4 + 3.2^1 = 10$	10
Mars	$4 + 3.2^2 = 16$	15
Planetoiden	$4 + 3.2^3 = 28$	28
Jupiter	$4 + 3.2^4 = 52$	52
Saturn	$4 + 3.2^5 = 100$	95
Uranus	$4 + 3.2^6 = 196$	192
Neptun	$4 + 3.2^7 = 388$	300

Ist die Uebereinstimmung der Zahlen der Titius-Bodeschen Reihe mit den tatsächlichen Entfernungen auch nicht vollständig, bei Neptun sogar sehr mangelhaft, so ist sie doch zu groß, um bloß für ein Spiel des Zufalls gehalten werden zu können. Der Wert 28 der Reihe kommt zwar keinem großen Planeten zu, dagegen den massenreicheren von der Gruppe der kleinen Planeten. Der Ausdruck $4 + 3.2^n$ gibt wahrscheinlich annähernd das mathematische, zurzeit noch nicht durch mechanische Prinzipien begründete Gesetz der Entfernungen wieder, welche für die Bildung der Planeten aus dem ursprünglich bis über den Neptun hinausreichenden Gasball oder was der frühere Zustand gewesen sein mag, besonders günstig waren. Der Mineraloge Goldschmidt in Heidelberg zeigt im 5. Band von Ostwalds „Annalen der Naturphilosophie", daß sich bei den Entfernungen der Planeten von der Sonne dieselben Zahlengesetze aussprechen wie in der Reihe der harmonischen Obertöne.

2. Die Planeten mit ihren Monden. Zu den obigen tabellarischen Angaben sind noch folgende Ergänzungen hinzuzufügen.

2a) Die inneren Planeten Merkur und Venus. Sie werden als innere bezeichnet, weil ihre Bahnen innerhalb der Erdbahn liegen, im Gegensatz zu den übrigen, den äußeren Planeten. Sie können nie der Sonne gegenüber — in Opposition zu ihr — kommen, dagegen auf zweierlei Weise mit ihr in Konjunktion, je nachdem sie nämlich, auf derselben Seite wie die Sonne stehend, eine größere oder geringere Entfernung als diese von der Erde besitzen (obere und untere Konjunktion). Ihre größten Winkelabstände, Elongationen, von der Sonne sind 29 und 48°. Sie erscheinen daher im Fernrohr immer sichelförmig. Fielen die Bahnen beider Planeten mit der Erdbahnebene, der Ekliptik, zusammen, so würden wir bei jedem synodischen Umlauf, d. h. in dem zwischen zwei gleichen Stellungen von Erde und Planet zur Sonne liegenden Zeitintervall, einen Vorübergang des Planeten vor der Sonnenscheibe beobachten. Da jene Voraussetzung aber nicht zutrifft, so kommen bloß dann solche Vorübergänge vor, wenn die Schnittlinie der Planetenbahn mit der Ekliptik, die sogenannte Knotenlinie, nahe in die Richtung Sonne-Erde fällt. Merkurvorübergänge finden deshalb durchschnittlich alle 8 Jahre, in ungleichmäßigen Zwischenräumen, statt; viel seltener sind die Venusvorübergänge, von denen die letzten und die nächstbevorstehenden in die Jahre 1761, 1769, 1874, 1882, 2004, 2012 fielen oder fallen werden. Die vier letzt stattgehabten Venusvorübergänge wurden zur Bestimmung der Entfernung der Erde von der Sonne benutzt. Durch die Entdeckung des Planetoiden Eros im Jahre 1898 haben die Venusvorübergänge jedoch ihre Bedeutung für diesen Zweck verloren, da Eros der Erde viel näher kommt als Venus und infolgedessen ein sichereres Resultat für jene Entfernung liefert (s. 2d).

Nicht geringe Schwierigkeit bereitete den Astronomen die Erklärung der Bewegung des Merkurperihels, das ist des der Sonne nächstliegenden Punktes der von Merkur beschriebenen Ellipse. Sie beträgt im Jahrhundert 640 Bogensekunden, in rechtläufigem Sinne, während auf die Einwirkung seitens der Planeten sich nur 600″ zurückführen lassen. Ein intramerkurieller Planet aber, dessen Einfluß die überschüssigen 40 Sekunden sich zuschreiben ließen, wurde trotz allen Suchens bei totalen Sonnenfinsternissen nicht gefunden. Wie v. Seeliger, Direktor der Münchener Sternwarte, es wahrscheinlich macht, dürften wir es hier mit dem Einfluß des um dieSonne gelagerten, bis über die Erdbahn hinausreichenden feinst verteilten Staubes zu tun haben, welcher besonders in den Tropen kurz vor Sonnenaufgang im Osten und nach Sonnenuntergang im Westen in dem sogenannten Zodiakallicht als ein der Milchstraße an Aussehen gleichender, vom Horizont aufsteigender Lichtkegel sichtbar wird.

Aus der Beobachtung gewisser, einen Helligkeitsunterschied aufweisender Stellen auf Merkur und Venus glaubte Schiaparelli (1835—1910, Direktor der Sternwarte zu Mailand) gefunden zu haben, daß bei beiden Planeten die Rotationszeit gleich ihrer Umlaufszeit um die Sonne sei, daß also beide Planeten der Sonne, wie der Mond der Erde, immer dieselbe Seite zukehrten, — das Endergebnis jedenfalls der durch die Gezeitenreibung verursachten Verlangsamung der Rotation jener Himmelskörper. Andere Beobachter glauben jedoch Schiaparellis Resultat nicht bestätigen zu können, mindestens

der Venus eine viel kürzere, etwa 23-stündige Rotationszeit zuschreiben zu müssen.

2b) Erde. Für die klimatischen Verhältnisse auf der Erde ist von besonderer Wichtigkeit der Umstand, daß ihre Rotationsachse unter 66½° gegen ihre Bahnebene geneigt ist, indem hierdurch der Wechsel der Jahreszeiten bedingt ist. Wäre die Erde eine vollkommene Kugel, so würde die Richtung der Rotationsachse während der Bewegung der Erde um die Sonne sich immer parallel bleiben. Da aber der Erdkörper am Aequator ausgebaucht ist, so kommt durch die Anziehung des Mondes und der Sonne auf diesen Wulst, wie Laplace (1749 bis 1827, Akademiker in Paris) gezeigt hat, eine kegelförmige Bewegung der Erdachse um die auf der Ekliptik senkrechte Richtung zustande, so daß der in der Verlängerung der Erdachse liegende Himmelspol im Lauf von 26 000 Jahren einen Kreis mit dem Halbmesser 23½° rückläufig — vom Innern der Himmelskugel aus gesehen also entgegengesetzt dem Zeiger der Uhr — um den Pol der Ekliptik beschreibt. Die (Frühlings- und Herbst-Tagundnachtgleichenpunkte genannten) Schnittpunkte der Ekliptik und des Himmelsäquators, das ist der beiden Großkreise, in welchen die erweiterten Ebenen der Erdbahn und des Erdäquators das Himmelsgewölbe treffen, gehen infolgedessen jährlich um 50″ auf der Ekliptik rückwärts, welche Erscheinung als Präzession bezeichnet wird. Da aber der Mond der Erde bald näher, bald ferner ist und sich bald nördlich, bald südlich von der Ekliptik befindet, so ist seine Wirkung auf den Aequatorwulst einer, Nutation genannten, Schwankung unterworfen, so daß der wahre Himmelspol, auf welchen die Erdachse hinweist, um den mittleren Pol in 19 Jahren, der Periode für den Umlauf der Mondknotenlinie, eine Ellipse beschreibt, deren große, nach dem Pol der Ekliptik gerichtete Achse 18,5″ und deren kleine Achse 13,7″ beträgt.

Präzession und Nutation bedingen also eine Lagenänderung der Rotationsachse der Erde im Raum, wodurch dieselbe nach anderen und anderen Sternen hinzielt, außerdem aber findet auch eine Lagenänderung der Rotationsachse im Erdkörper statt, so daß die Pole auf der Erdoberfläche wandern und die Polhöhen oder geographischen Breiten der Erdorte sich ändern, weshalb man diese Erscheinung als Polhöhenschwankung bezeichnet. Hierbei ist die Rotationsachse der Erde immer nach demselben Stern gerichtet zu denken. Eine solche Wanderung des momentanen oder wahren Pols um eine mittlere Lage muß stattfinden und zwar im Sinn der täglichen Bewegung des Erdkörpers, wenn die Rotationsachse mit der kleinen Achse (Hauptträgheitsachse) des Erdellipsoids nicht zusammenfällt. Während aber nach Euler (1707 bis 1783, Akademiker in Berlin und St. Petersburg) die Periode eines Umlaufes des wahren Pols um den mittleren bei den für die Erde geltenden Werten der Hauptträgheitsmomente 10 Monate betragen sollte, wobei die Erde, was nicht ganz zulässig, als starrer Körper angenommen ist, so beträgt sie in Wirklichkeit über ein Jahr und ist in ihren einzelnen Zügen durchaus noch nicht erklärt.

Figur 1 gibt die Polbewegung zwischen 1906,0 und 1912,0. Die Abweichung des wahren vom mittleren Pol beträgt im Maximum 0,″35 oder 11 m.

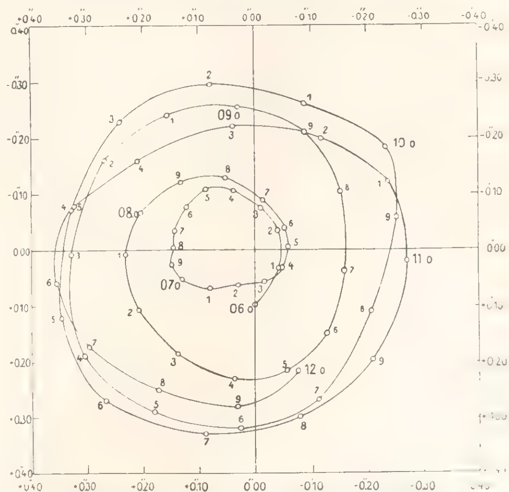


Fig. 1. Bewegung des wahren um den mittleren Erdpol von 1906,0 bis 1912,0.

Beim Mond kann man 5 Umlaufszeiten unterscheiden: 1. die siderische, 27,32166 Tage, nämlich die Zeit, welche der Mond braucht, um am Sternenhimmel 360⁰ zurückzulegen, 2. die etwas kürzere tropische Umlaufszeit, 27,32150 Tage, welche der Mond braucht, um vom Meridian des (eine rückwärtige Bewegung ausführenden) Frühlingspunktes wieder in diesen Meridian zu kommen, 3. die synodische, 29,53059 Tage, die Zeit, welche der Mond braucht, um wieder in dieselbe Stellung zur Sonne zu kommen, also die Zeit zwischen zwei gleichen Mondphasen, 4. die anomalistische, 27,55460 Tage, von dem jährlich 41⁰ vorwärts schreitenden Perigäum (Erdnähe) bis zum nächsten Perigäum, und 5. die drakonitische (Drachenmonat) 27,21222 Tage, vom Durchgang durch den jährlich 19⁰ rückwärts schreitenden aufsteigenden (oder absteigenden) Knoten bis zu demselben Knoten.

Ist bei Vollmond der Mond nahezu in einem der Knoten, also in der Ekliptik, so findet eine Mondfinsternis statt; ist er bei Neumond in der Nähe eines Knotens, so tritt eine Sonnenfinsternis ein. Während aber eine Mondfinsternis überall, wo der Mond über dem Horizont steht, am östlichen Rand beginnend und am westlichen endend, gleichzeitig gesehen wird, ist eine Sonnenfinsternis nur längs eines Streifens der Erdoberfläche zuerst von den westlich Wohnenden, für welche der Mond gerade aufgeht, und zuletzt von den östlich Wohnenden, für welche er gerade untergeht, zu beobachten. Ist der Mond der Erde besonders nahe, so kann die Zone, innerhalb welcher die Sonne total verfinstert gesehen wird, über 200 km breit sein; außerhalb dieser Zone wird man nur eine partielle oder gar keine Finsternis haben. Erreicht bei großer Entfernung des Mondes die Spitze des Schattenkegels die Erdoberfläche nicht, so kommt eine ringförmige Finsternis zustande. Da bei einer Mondfinsternis der Mond nicht so weit von der Ekliptik abstehen darf als bei einer Sonnenfinsternis, so sind die letzteren anderthalbmal so häufig als die ersteren. Für einen bestimmten Ort aber sind sie dreimal seltener und eine totale oder ringförmige Sonnenfinsternis ist an demselben Ort durchschnittlich nur alle 200 Jahre zu beobachten.

Aus den Angaben über Ort und Zeit der Sichtbarkeit von Sonnenfinsternissen des Altertums geht eine Zunahme der Geschwindigkeit des Mondes hervor. Hätte der Mond schon vor 2500 Jahren seine heutige Geschwindigkeit besessen, so wäre seine Stellung an der Himmelskugel damals um 40′ westlicher gewesen. Nach Delaunay (1816 bis 1872, Direktor der Pariser Sternwarte) ist die Geschwindigkeitszunahme des Mondes jedoch nur scheinbar, in Wirklichkeit hat infolge der Gezeitenreibung eine Verlangsamung der Erdrotation, also eine Vergrößerung des als Zeitmaß dienenden Tages stattgefunden. Es genügt zur Erklärung der Erscheinung die Zunahme der Tageslänge um nicht ganz $^1/_{100}$ Sekunde in 2500 Jahren.

Die Mondbahn ist 5⁰9′ gegen die Ekliptik geneigt. Ihre Knotenlinie, welche in 18,6 Jahren einen Umlauf von Ost nach West ausführt, ist zugleich auch die Schnittlinie des Mondäquators mit der Ekliptik, die sich unter 1⁰37′ schneiden, und zwar liegt die Ekliptik stets zwischen Mondbahn und Mondäquator.

Der Mond ist, wenn überhaupt, nur von einer äußerst dünnen Atmosphäre umgeben, denn die Sterne verschwinden, wenn der Mond vor sie tritt, ganz augenblicklich, ohne erst lichtschwächer geworden zu sein. Die Berge erheben sich über die nach älterer Deutung noch als Meere bezeichneten Tiefebenen bis zu 7500 m, wie man durch Messung der Schattenlänge findet. Oft ähneln sie durch ihre Ringform mit zentraler Vertiefung, in der sich häufig noch ein kleiner Kegel erhebt, irdischen Kratern. Wahrscheinlich sind sie dadurch entstanden, daß bei dem Einschrumpfen der erkaltenden Kruste diese von dem glühenden Magma an verschiedenen Stellen durchbrochen wurde und die aufgeworfenen Wälle stehen blieben. Von den Kratern Kopernikus und Tycho gehen Streifen aus, die am besten um die Vollmondszeit zu sehen sind. Sie gehen über Berge und Täler hinweg und bestehen vielleicht aus Glaskügelchen, welche sich bei der Erstarrung der aus jenen Kratern ausgeworfenen Masse gebildet haben und nur bei geeigneter Mondphase die Sonnenstrahlen nach der Erde reflektieren. Sehr von der Mondphase hängt auch die Sichtbarkeit der Rillen ab, Sprünge in der Mondkruste, deren über tausend jetzt bekannt sind. Von den öfter auf dem Mond wahrgenommenen Aenderungen scheint die von J. Schmidt (1825 bis 1884, Direktor der Sternwarte in Athen) behauptete Verflachung des Kraters Linné und die von H. Klein in Köln behauptete Neubildung eines kleinen Kraters bei Hyginus Anspruch auf Glaubwürdigkeit zu haben. — Daß der Mond uns immer dieselbe Seite zukehrt, ist zweifellos eine Folge der früher, als er noch nicht erstarrt war, dort vorhanden gewesenen Gezeiten. — Die Helligkeit des Mondes in Größenklassen ist gleich —11,8, wenn mittels des Helligkeitsverhältnisses 2,5 zwischen zwei der n. und n-1. Größenklasse angehörenden Sternen die Größen-

klassen über Null hinaus nach der negativen Seite zur Bezeichnung hellerer Objekte als solcher 1. Größe fortgesetzt werden (vgl. den Artikel „Selenologie").



Fig. 2. Photographie des Mondes kurz vor dem letzten Viertel.

2c) Mars. Auf dem Mars lassen sich helle und dunkle Stellen unterscheiden, von denen man die ersteren, die $^3/_4$ der ganzen Oberfläche einnehmen, als Land, die letzteren als Meere zu bezeichnen pflegt, während der Astronom Schäberle auf der Lick-Sternwarte in Kalifornien der entgegengesetzten Ansicht ist. Die besonders hellen Partien an den Polen hält man oft für Schnee und Eis, zumal sie auf der Halbkugel, welche gerade Sommer hat, zurückzugehen und auf der anderen, welche Winter hat, zuzunehmen pflegen. Die Atmosphäre des Mars aber ist längst nicht von der Dichte der irdischen, da die Schwerkraft auf der Marsoberfläche nur $^1/_3$ der an der Erdoberfläche ist, auch merkt man keine Trübung des Marsbildes durch Wolken oder Nebel auf dem Mars. Es dürfte daher jener Niederschlag in den Polargegenden nur aus millimeterdickem Rauhreif bestehen, wenn überhaupt Wasser auf dem Mars vorhanden ist, was nach den spektroskopischen Beobachtungen Campbells, des Direktors der Lick-Sternwarte auf dem Mt. Hamilton, nicht der Fall ist. Die „Meere" werden wir uns daher besser nicht mit Wasser angefüllt und die Polargegenden nicht mit Schnee und Eis bedeckt denken, sondern vielleicht mit fester Kohlensäure, die dem Schnee ja an Aussehen gleicht.

Eine wesentliche Förderung hat die Topographie des Mars durch Schiaparelli erfahren, dessen Entdeckung der die Festländer durchziehenden und sich bisweilen verdoppelnden Kanäle großes Aufsehen erregte, zumal phantasiereiche Leute in diesen Gebilden Werke intelligenter Wesen auf dem Mars vor sich zu haben glaubten. Den Ein-

Fig. 3. Uebersichtskarte des Planeten Mars, nach den Beobachtungen von Schiaparelli von 1877 bis 1888.

druck von Linien gewinnt man aber auch, wie zuerst der italienische Astronom Cerulli betonte und wie Versuche, die in England und Amerika angestellt wurden, bestätigt haben, durch eine Reihe nicht miteinander zusammenhängender Punkte, wenn man sie aus großer Entfernung betrachtet. So steht denn die Realität der Kanäle sehr in Frage, deren Breite von 30 km wohl auch für die Marsbewohner einen allzu großen Luxus bedeutete. Wie man die von Schiaparelli beobachtete Verdoppelung der Kanäle zu deuten hat, ist noch durchaus unsicher.

Die beiden Marsmonde Phobos und Deimos haben Umlaufszeiten von 7,65 und 30,30 Stunden. Ersterer braucht also weniger als ein Drittel der Zeit zu einem Umlauf um Mars, die dieser zu einer Rotation braucht. Es ist daher nicht wohl anzunehmen, daß er aus einem vom Planeten abgelösten Ringe sich gebildet habe. Manche Astronomen halten beide Monde für vom Mars eingefangene Planetoiden, wofür aber ihre kreisförmigen, in die Aequatorebene des Mars fallenden Bahnen jedenfalls nicht sprechen.

Vom Mars aus gesehen geht Phobos während eines Marstages zweimal im Westen auf und im Osten unter, Deimos aber braucht 2,7 Marstage von seinem Aufgang im Osten bis zu seinem Untergang im Westen.

2d) Planetoiden. Der weite Zwischenraum zwischen Mars und Jupiter ist von den kleinen Planeten besetzt, deren zurzeit über 700 bekannt sind. Meist werden sie jetzt photographisch gefunden, indem sie sich auf der etwa eine Stunde lang exponierten Platte als kleine Striche unter den als Pünktchen abgebildeten Sternen verraten; das Fernrohr muß während der Aufnahme natürlich der Bewegung des Himmels durch ein Uhrwerk nachgeführt werden. Der Durchmesser der Planetoiden mag bis 1000 km betragen. Ihre Bahnen sind im allgemeinen stärker exzentrisch als die der großen Planeten und auch steiler gegen die Ekliptik — bis zu 34° — geneigt. Sehr auffälligerweise befindet sich, wie auch beim Saturnring, im Schwarm der Planetoiden stets da eine Lücke, wo ein diese Stelle einnehmender Planet eine Umlaufszeit hätte, die zu der von Jupiter oder Saturn in rationalem Verhältnis stände. Der Grund hierfür ist noch nicht gefunden. Die früher allgemein für richtig gehaltene Ansicht, daß die Bahn eines solchen Planeten wegen der immer wieder in demselben Sinn auftretenden Störungen keinen Bestand haben könnte, hat sich als irrtümlich herausgestellt (näheres s. unter 7).

Von besonderer Wichtigkeit ist der von Witt 1898 auf der Urania-Sternwarte in Berlin entdeckte Planet 433 Eros, weil er der Erde näher als irgendein anderer Planet kommt und darum zur Bestimmung der Entfernung der Erde von der Sonne, welche in der Astronomie als Längeneinheit dient, mit Vorteil verwandt werden kann. Die Bestimmung jener Entfernung oder, wie man auch oft sagt, weil es auf dasselbe hinauskommt, die Bestimmung der Sonnenparallaxe, d. h. des Winkels, unter welchem von der Sonne der (durch die geodätischen Messungen bekannte) Erdhalbmesser erscheint, bedeutet daher die Zurückführung der astronomischen Längeneinheit auf irdisches Maß. Da die Exzentrizität der Erosbahn gleich 0,22 ist, so schwankt die Entfernung des Eros von der Sonne zwischen 1,133 und 1,783 Erdbahnhalbmessern, seine geringste Entfernung von uns ist demnach 0,133 Erdbahnhalbmesser. Wird Eros bei großer Annäherung an die Erde auf zwei weit auseinanderliegenden Sternwarten in dem gleichen Moment, wie wir der Einfachheit halber annehmen wollen, beobachtet, so werden die beiden Oerter, auf welche sich Eros den beiden Beobachtern an die Himmelskugel projiziert, etwa 70″ voneinander entfernt sein. Unter diesem Winkel erscheint demnach von Eros aus die Erdsehne, welche beide Sternwarten verbindet. Mit seiner Hilfe kann dann, weil die Länge der Erdsehne in irdischen Maßeinheiten bekannt ist, auch die Entfernung des Eros von der Erde in irdischem Maße erhalten werden. Das dritte Keplersche Gesetz, welches aus den bekannten Umlaufszeiten von Erde und Eros das Verhältnis ihrer Entfernungen von der Sonne liefert, läßt sodann leicht auch diese Entfernungen in irdischen Maßeinheiten finden.

2e) Jupiter. Dieser größte und massenreichste der Planeten zeigt parallel seinem Aequator mehrere von Rotbraun bis Rosa in ihrer Färbung wechselnde Streifen, deren feineres Detail öfteren Aenderungen unterworfen ist. Seine Rotationszeit ergibt sich ähnlich wie bei der Sonne für den Aequator kleiner als für die Zone von 10 bis 45° Breite, dort nämlich zu $9^h 50^m$, hier zu $9^h 55^m$, doch zeigen auch einzelne Flecken, offenbar infolge eigener Bewegung eine veränderliche Geschwindigkeit, so der im Jahre 1878 erschienene, in manchen Jahren sehr auffällige, in anderen wieder viel blassere ovale rote Fleck (s. Fig. 4), welcher 1878 bis 1880 eine Rotationszeit von $9^h 55^m 35{,}1^s$, 1887 eine solche von $9^h 55^m 40{,}6^s$ besaß.

Von den 8 Monden, welche jetzt von Jupiter bekannt sind, wurden die 4 hellsten gleich nach Erfindung des Fernrohrs 1609 und 1610 von Simon Marius (Mayr) (1570 bis 1624; Hofastronom in Ansbach)

und Galilei (1564 bis 1642) entdeckt. Sie bieten durch ihren Eintritt in und Austritt aus dem Jupiterschatten, durch ihre Vorübergänge vor der Jupiterscheibe, wobei sich ihr Schatten auf dieser erkennen läßt, und durch ihr Verschwinden hinter derselben Gelegenheit zu interessanten Beobachtungen. Der innerste von ihnen diente Olaf Römer

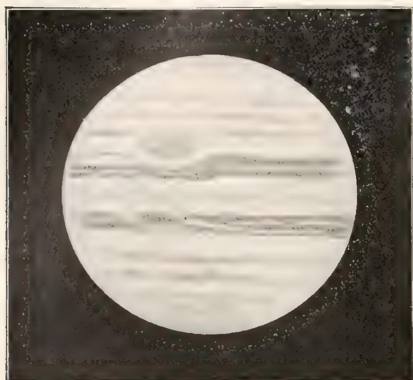


Fig. 4. Jupiter.

(1644 bis 1710; erster Direktor der Sternwarte zu Kopenhagen) 1676 zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Lichtes. Römer bemerkte nämlich, daß die Verfinsterungen sich um die Zeit der Opposition des Jupiter um $8^1/_4$ Minuten verfrühten, um die Zeit der Konjunktion dagegen um $8^1/_4$ Minuten verspäteten. Den Grund erkannte er richtig darin, daß das von dem Trabanten reflektierte Licht im ersten Fall eine um den Erdbahnhalbmesser kürzere, im zweiten Fall eine ebensoviel längere Strecke zu durchlaufen hat.

Für die Bewegung der drei inneren Monde besteht das von Laplace als notwendig nachgewiesene Gesetz: Die mittlere Länge des ersten Mondes vermehrt um die doppelte mittlere Länge des dritten ist gleich der dreifachen mittleren Länge des zweiten, vermehrt um 180°.

Im Jahre 1892 entdeckte Barnard auf der Lick-Sternwarte in nächster Nähe des Jupiter den V. Mond, der, wenn Jupiter ihn nicht überstrahlte, den Eindruck eines Sternchens 13. Größe machen würde. Einen um so größeren Abstand zeigten die Monde VI und VII, die auf der gleichen Sternwarte von Perrine 1905 photographisch entdeckt wurden und im Gegensatz zu den übrigen eine starke Neigung gegen die Ekliptik haben. Der noch viel weiter entfernte, von Melotte auf der Greenwicher Sternwarte 1908 entdeckte VIII. Trabant ist sogar rückläufig, was in der Tabelle der Monde (s. im Abschnitt 1) dadurch zum Ausdruck kommt, daß der im Knoten von der rechtläufigen Richtung der Ekliptik und der Bewegungsrichtung eingeschlossene Neigungswinkel der Trabantenbahn mehr als 90° beträgt.

2f) Saturn. Saturn zeigt eine ziemlich gleichförmige Oberfläche. Der ihn umgebende Ring, erst von Huygens (1629 bis 1695; Physiker im Haag) als solcher erkannt, weist mehrere Lücken — Cassinische Teilung, Enckesche Teilung — auf und besteht überhaupt aus lauter kleinen Körperchen, die wie Monde um den Saturn laufen.

Ein fester oder flüssiger Ring würde, wie Maxwell (1831 bis 1879; Professor der Physik in Cambridge, England) und Hirn (1815 bis 1890; Physiker in Colmar) bewiesen haben, sich im labilen Gleichgewicht befinden müssen, also keinen Bestand haben. Der Astrophysiker Belopolski auf der Sternwarte in Pulkowo hat in der Tat durch Messung der Linienverschiebung im Spektrometer eine nach dem Innern des Ringes hin stattfindende Zunahme der Umdrehungsgeschwindigkeit nachweisen können; und auch die photometrischen Beobachtungen

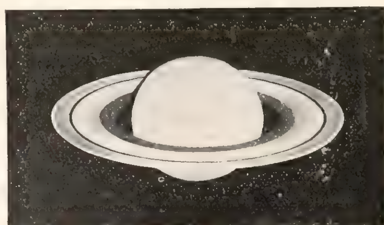


Fig. 5. Saturn.

Müllers auf dem Astrophysikalischen Observatorium in Potsdam, sowie die theoretisch-photometrischen Untersuchungen Seeligers in München sprechen dafür. Aus dem Umstand, daß der Ring, wenn die Erde oder auch die Sonne in seiner Ebene stehen, mit den größten Fernrohren gerade

noch als zarte, an mehreren Stellen unterbrochene Linie zu sehen ist, schloß Barnard auf eine Dicke desselben von 350 km. Mit anderen Fernrohren ist er in diesem Fall gar nicht mehr zu sehen, ebenso wenn seine Ebene zwischen Sonne und Erde hindurchgeht, so daß er die unbeschienene Seite der Erde zukehrt. Seine Masse ist unbestimmbar gering, nicht über $^1/_{100\,000}$ der Saturnmasse.

Von den Monden des Saturn kommt der von Huygens entdeckte Titan unserem Erdmond an Größe und Masse ungefähr gleich. Die Bahnebenen fallen bei den ersten 7 Monden mit der des Ringes und des Saturnäquators nahe zusammen, Japetus und Themis, welch letztere merkwürdigerweise fast dieselbe Umlaufszeit hat wie Hyperion, haben dagegen stark abweichende Bahnlagen, namentlich aber Phoebe, welche rückläufig ist und wie Themis photographisch auf der Sternwarte zu Arequipa in Peru, einer Filiale der Sternwarte zu Cambridge, Mass., entdeckt wurde. Von solchen in das Gefüge der übrigen schlecht hineinpassenden Satelliten, wie z. B. auch von den 3 letzten Jupitermonden und den Marsmonden nehmen manche Astronomen an, daß sie bei einer zufälligen Annäherung von dem Planeten eingefangen worden seien. Helligkeitsschwankungen bei Japetus, Phoebe, wie auch bei den 4 hellen Jupitermonden legen wegen ihrer Abhängigkeit von der Stellung des Trabanten zum Planeten den Verdacht nahe, daß diese Monde ihren Planeten immer dieselbe Seite zukehren. Dasselbe geschieht vielleicht auch von manchem anderen Trabanten, der aber wegen seiner auf der ganzen Oberfläche gleichen Albedo keine solche Helligkeitsschwankungen zeigt.

Die Monde des Saturn beeinflussen sich stark in ihren Bewegungen, weil die Umlaufszeiten einiger in rationalem Verhältnis zueinander stehen, so daß sie nach kurzer Zeit wieder in dieselbe Lage zueinander kommen und somit in derselben Weise wie früher störend aufeinander einwirken. So ist die Umlaufszeit von Tethys das Doppelte der Umlaufszeit von Mimas, die von Dione das Doppelte der von Enceladus und das Dreifache der Umlaufszeit von Hyperion nahe gleich dem Vierfachen der von Titan. H. Struve hat aus seinen Pulkowoer Beobachtungen der Saturnsatelliten die Gesetze gefunden und als mechanisch notwendig erwiesen:

1. Der Konjunktionspunkt von Mimas und Tethys entfernt sich um höchstens 49° von dem zwischen den aufsteigenden Knoten ihrer Bahnen auf dem Saturnäquator in der Mitte liegenden Punkt und führt diese Libration in 70,6 Jahren aus.

2. Die Konjunktionen von Enceladus und Dione fallen mit dem Perisaturnium von Enceladus zusammen oder sie oszillieren um diesen Punkt.

Infolge der starken Abplattung des Saturn müssen sich die Knotenlinien der Trabantenbahnen auf der Saturnäquatorebene rückwärts, die Apsidenlinien, das ist die großen Achsen der Ellipsen, aber vorwärts bewegen, beides in um so stärkerem Maße, je enger die Bahn ist. So bewegt sich die Apsidenlinie bei Mimas jährlich 365° vorwärts, bei Enceladus 124°, bei Titan 0,5°, bei Hyperion aber scheinbar entgegen der Theorie jährlich 18° rückwärts, eine Folge der Störung durch Titan. Die Veränderlichkeit der Umlaufszeit von Titan und die in der Bewegung des Hyperion auftretenden Unregelmäßigkeiten sind theoretisch noch nicht erklärt.

2g) Uranus und Neptun. Während bei Saturn Aequatorebene und Bahnebene einen Winkel von 28° einschließen, scheint bei Uranus dieser Winkel ungefähr 90° groß zu sein, wenn man annehmen darf, daß die Bahnebenen seiner 4 Monde mit seiner Aequatorebene zusammenfallen. Falls die Rotationsachse des Uranus einmal senkrecht auf der Bahnebene gestanden hat, so ist sie, jene Annahme als richtig vorausgesetzt, um 98° umgelegt worden.

In noch stärkerem Maße ist dies vielleicht der Fall bei Neptun, dessen einziger Mond in einer um 142° gegen die Ekliptik geneigten Bahn läuft.

Uranus wurde 1781 von W. Herschel (1738 bis 1822; Privatastronom des Königs Georg III von England) gefunden, Neptun 1846 von J. G. Galle (1812 bis 1910; damals Observator der Berliner Sternwarte) nach der Rechnung Leverriers (1811 bis 1877; Direktor der Pariser Sternwarte), welcher aus den Abweichungen des Uranus von dem berechneten Lauf die Bahn eines hypothetischen, diese Störungen verursachenden Planeten zu bestimmen gesucht hatte.

3. Kometen. Die Kometen teilt man ein in periodische, d. i. solche, welche zur Sonne wieder zurückkehren, und in nichtperiodische. Man bezeichnet sie entweder in der Reihenfolge ihrer Entdeckung mit Jahreszahl und einem Buchstaben des Alphabets oder in der Reihenfolge ihrer Periheldurchgänge mit der Jahreszahl und einer Nummer. Die periodischen Kometen werden mit dem Namen des Entdeckers oder — bei Encke und Halley — mit dem Namen des Berechners bezeichnet, der sie mit früher erschienenen Kometen identifiziert hat.

Die folgende Tabelle gibt die 20 Kometen, welche in mindestens zwei Erscheinungen, also bei mindestens einer Wiederkehr zur Sonne beobachtet worden sind.

Bezeichnung der Kometen	Umlaufszeit in Jahren	Kleinster Abstand von der Sonne	Größter Abstand von der Sonne	Jahr der ersten beobachteten Erscheinung	Anzahl der beobachteten Erscheinungen	Jahr der letzten beobachteten Erscheinung
Encke	3,30	0,34	4,10	1786	32	1911
Tempel II	5,28	1,39	4,68	1873	5	1904
Brorsen	5,46	0,59	5,61	1846	5	1879
Tempel III-Swift	5,54	1,09	5,17	1869	4	1908
De Vico-Swift	5,82	1,39	5,08	1844	2	1894
Winnecke	5,83	0,92	5,56	1819	8	1909
Perrine	6,44	1,11	5,81	1896	2	1909
Tempel I	6,50	2,07	4,90	1867	3	1879
Biela	6,62	0,86	6,19	1772	6	1852
Finlay	6,66	1,00	6,08	1886	3	1906
d'Arrest	6,67	1,32	5,77	1851	7	1910
Wolf	6,84	1,60	5,60	1884	4	1911
Holmes	6,87	2,13	5,10	1892	3	1906
Borrelly	6,93	1,40	5,87	1905	2	1911
Brooks	7,10	1,95	5,43	1889	4	1910
Faye	7,56	1,74	5,97	1843	9	1910
Tuttle	13,67	1,02	10,41	1790	6	1912
Pons-Brooks	71,5	0,78	32,94	1812	2	1884
Olbers	72,6	1,20	33,60	1815	2	1887
Halley	76,3	0,59	35,39	239 v. Chr	27	1910

Zu den kurzperiodischen Kometen gehören auch 10 seit 1880 entdeckte Kometen mit weniger als 9 Jahren Umlaufszeit, welche aber bei keiner folgenden Wiederkehr zur Sonne wieder aufgefunden werden konnten. Bei den 3 Kometen 1906 IV Kopff, 1906 VI Metcalf und 1909 IV Daniel, welche Umlaufszeiten von 6,6, 8,2, 6,4 Jahren besitzen, steht die erste Rückkunft noch bevor.

Bei den übrigen Kometen ist entweder eine Ellipse von mehrhundertjähriger Umlaufszeit ausgerechnet worden oder eine Parabel, welche natürlich eine Wiederkehr ausschließen würde. Bei einigen Kometen hat sich die Bahn sogar als eine Hyperbel erwiesen, doch ist die Hyperbel, wie sich bei jedem dieser Kometen zeigen läßt, erst aus einer Parabel — oder richtiger: ganz nahe parabolischen Bahn, denn die Parabel stellt nur einen Grenzfall dar, für dessen Eintritt die Wahrscheinlichkeit gleich Null ist — durch die von den großen Planeten, insbesondere von Jupiter ausgeübte Störung entstanden. Andererseits sind aber auch die oben aufgeführten kurzperiodischen Kometen aller Wahrscheinlichkeit nach erst durch Jupiter oder einen anderen Planeten in ihre enge elliptische Bahn gedrängt worden. Die Astronomen sind sich zurzeit noch nicht einig, ob sie den Kometen kosmischen Ursprung zuerkennen sollen oder nicht. Zunächst scheint das Fehlen ausgeprägt hyperbolischer Bahnen für die Zugehörigkeit der Kometen zu unserem Sonnensystem zu sprechen. Denn da z. B. alle Kometen, deren Geschwindigkeit in einer Entfernung von 100000 Erdbahnhalbmessern von der Sonne relativ gegen diese größer als 133 m in der Sekunde ist, Hyperbeln beschreiben müssen, die Möglichkeit von Geschwindigkeiten über diesem Betrag aber bedeutend größer ist als die geringerer Geschwindigkeiten, so werden unter der Voraussetzung des kosmischen Ursprungs der Kometen hyperbolische Bahnen sehr viel häufiger vorkommen müssen als elliptische. Ganz anders gestaltet sich das Verhältnis aber für die uns sichtbar werdenden Kometen. Sichtbar wird im allgemeinen ein Komet uns nur, wenn er der Sonne bis auf zwei Erdbahnhalbmesser nahe kommt. Dazu ist aber erforderlich, daß er in jener Entfernung von 100000 Erdbahnhalbmessern entweder eine sehr geringe Geschwindigkeit relativ zur Sonne besitzt, so daß diese ihn von seinem meist jedenfalls nicht auf die Sonne zu gerichteten Wege genügend ablenken und an sich heranziehen kann, oder daß seine Geschwindigkeit, wenn sie groß ist, sehr genau auf die Sonne gerichtet ist. Für diesen zweiten Fall, der eine hyperbolische Bahn zur Folge haben würde, ist aber die Wahrscheinlichkeit äußerst gering.

Wenn man die Kometen als von Haus aus zu unserem Sonnensystem gehörig ansehen will, so bleibt die Entstehung der stark exzentrischen Bahnen schwer erklär-

bar, sowie nicht minder deren häufig starke Neigung gegen die Ekliptik und die eben so oft wie die Rechtläufigkeit vorkommende Rückläufigkeit.

Das Spektroskop hat bei den Kometen, welche lichtstark genug waren, um der Beobachtung mit diesem Instrument unterworfen werden zu können, immer das aus drei hellen Banden bestehende Kohlenoxydspektrum gezeigt. Die Banden liegen im Gelb, Grün und Blau und sind nach dem Rot hin scharf begrenzt, nach dem Blau hin aber verwaschen. Bisweilen kommen auch noch dem Cyan angehörende Banden vor. Das oft darüberliegende schwache kontinuierliche Spektrum ist jedenfalls das von den einzelnen kleinen, festen Teilchen des Kometenkernes reflektierte Sonnenspektrum. Bei dem periodischen Kometen Holmes 1892 III war nur das kontinuierliche Spektrum vorhanden.

Da die Lichtstrahlen eines Fixsternes bei einer Bedeckung desselben durch einen Kometen keine Strahlenbrechung erleiden, so dürfte der Kometenkern wohl aus getrennten festen Partikelchen von Kohlenstoffverbindungen bestehen, die bei ihrer Annäherung an die Sonne auf der dieser zugewandten Seite verdampfen. Die Sonne aber übt, wie der Anblick des Kometen auf das deutlichste zeigt, auf die Ausströmungen eine abstoßende Wirkung aus, sei sie, wie Olbers (1758 bis 1840; Arzt und Astronom in Bremen) vermutete, elektrischer Natur, oder, wie man jetzt vielfach meint, eine Folge des Lichtdruckes. Dadurch erfährt die Ausströmung eine Umbiegung nach hinten, auf der Seite nach der Sonne bildet sich eine Haube oder Coma, auf der entgegengesetzten Seite ein Schweif. Bredichin (1831 bis 1904; Direktor der Sternwarten in Moskau und Pulkowo) unterscheidet 3 Schweiftypen, nämlich solche, bei denen die abstoßende Kraft der Sonne etwa 18-mal oder 1- bis 2-mal oder nur etwa $^1/_5$-mal so groß ist wie die Anziehung. Die Schweife des ersten Typus sind lang, schmal, an den Seiten scharf begrenzt und, wie die dunklere Mittellinie andeutet, im Innern hohl. Die Schweife der beiden anderen Typen sind dagegen breit und verwaschen. Bisweilen finden sich die verschiedenen Typen gleichzeitig vor, und es hebt sich in diesem Fall der Schweif des ersten Typus deutlich von den anderen ab. Die öfters zu beobachtende Krümmung der Schweife ist jedenfalls durch das Verhältnis der Ausströmungsgeschwindigkeit zur Geschwindigkeit des Kometen in seiner Bahn bedingt. Die Verschiedenheit der Schweiftypen ist vielleicht durch die Verschiedenheit der Stoffe zu erklären, welche den Kometen bilden und entweder, wenn man die Elektrizität für die Ursache der Schweifbildung hält, verschieden stark elektrisch sind, oder wenn man dem Lichtdruck jene Rolle zuweist, eine verschiedene Größe der Partikelchen und ein verschiedenes spezifisches Gewicht besitzen. Bei den Kometen 1907 IV, 1892 I und 1908 III hat sich die abstoßende Kraft sogar gleich dem 75-, 90-, ja dem mehrtausendfachen der Anziehungskraft ergeben. Beim Kometen 1892 I scheint man auch nicht ohne eine vom Kometenkern selbst ausgehende Abstoßungskraft auskommen zu können.

Der von der Sonne auf ein kugelförmiges Partikelchen ausgeübte Lichtdruck überwiegt bekanntlich nur dann über die Gravitationskraft, wenn der Durchmesser des Tröpfchens — sein spezifisches Gewicht gleich dem des Wassers angenommen — unter 0,0015 mm hinabgeht. Liegt der Durchmesser aber unterhalb $^1/_{10}$ dieses Wertes, so überwiegt wieder die Gravitation. Nun bestehen die Kometenschweife mindestens zum Teil aus Gasen; werden doch die Leuchterscheinungen in den Kometenschweifen von den Physikern auf die Fluoreszenz stark beleuchteter Gase zurückgeführt. Die Größe der Gasmolekeln liegt aber sicher weit unter jener Grenze, bei welcher der Lichtdruck noch der Gravitation das Gleichgewicht hält, und es ist daher nicht recht einzusehen, wie infolge des Lichtdruckes überhaupt Gase im Schweif vorkommen können.

Wie aus dem Gesagten hervorgeht, ist man über die physische Beschaffenheit der Kometen, insbesondere auch über das Zustandekommen der Schweife, deren man bis zu sieben schon bei einem Kometen gleichzeitig beobachtet hat, noch sehr im unklaren, sicher aber ist, daß die Schweife aus stofflichen Ausströmungen bestehen, die in den Weltenraum hinaus erfolgen und die Masse des Kometen vermindern.

Figur 6 gibt eine von Metcalf in Taunton (Mass.) erhaltene Aufnahme des Kometen 1908 III (Morehouse) wieder, der durch seinen eigentümlichen, bisweilen einem gedrehten Stab gleichenden und sein Aussehen oft von einem Tag zum andern stark ändernden Schweif das besondere Interesse der Astronomen erregte.

Bei dem lockeren Zusammenhalt, den die Kometenmasse besitzt, kommen bisweilen Teilungen infolge der Verschiedenheit der Anziehung vor, welche die Sonne oder ein Planet auf die näheren und entfernteren Teile des Kometen ausübt. So teilte sich im Jahre 1846 der Bielasche Komet in zwei Teile von verschiedener Helligkeit. Der weniger helle Teilkomet nahm an Lichtstärke zu, bis er dem anderen gleichkam, dann aber nahm er wieder ab,

so daß er weniger lange beobachtet werden konnte als jener. Bei der Wiederkehr im Jahre 1852 hatten beide Teile eine größere Entfernung als kurz nach der Teilung und entfernten sich noch etwas mehr voneinander. Später ist der Komet, auch wenn er der Rechnung nach eine für seine Sichtbarkeit recht günstige Stellung zur Erde hatte, nie mehr gesehen worden, hat sich also jedenfalls noch weiter aufgelöst.



Fig. 6. Komet 1908 III (Morehouse) am 15. Nov. 1908.

Der periodische Komet Brooks 1889 V zeigte 4 Nebenkometen, die sich wahrscheinlich im Jahre 1886 vom Hauptkometen getrennt hatten, als er sich $2\frac{1}{2}$ Tage lang in geringerer Entfernung vom Jupiter befand als dessen 4. Mond. Während das

Jupitersystem dadurch aber nicht die mindeste Störung erlitt, wurde der Komet aus der bis dahin von ihm beschriebenen Ellipse von 31,4 Jahren Umlaufszeit, wo er der Sonne nur auf 5½ Erdbahnhalbmesser nahe kam, in eine solche von 7,1 Jahren Umlaufszeit übergeführt, so daß er nun der Sonne sich auf 1,95 Erdbahnhalbmesser näherte und von der Erde aus sichtbar wurde.

Ebenso ist der nach seinem Berechner benannte Lexellsche Komet im Jahre 1767 durch das System der Jupitermonde hindurchgegangen, wobei seine sehr weite Bahn in eine enge Ellipse von 5½ Jahren Umlaufszeit verwandelt wurde. Er kam so der Erde nahe genug, daß er 1770 entdeckt werden konnte, ja er näherte sich ihr bis auf die sechsfache Entfernung unseres Mondes. Bei seiner Wiederkehr 1776 konnte er nicht gesehen werden, weil er nur bei Tage und bei heller Dämmerung über dem Horizont stand, im Jahr 1779 aber kam er wieder in die Nähe des Jupiter, der ihn in eine weite, seine Wiederauffindung ausschließende Bahn hinauswarf.

Die drei großen Kometen 1843 I, 1880 I und 1882 II, welche jetzt nahezu identische Ellipsen von etwa 800 Jahren Umlaufszeit beschreiben, haben nach den Untersuchungen von Kreutz (1854 bis 1907; Professor der Astronomie in Kiel) früher einen einzigen Kometen gebildet, von dem bei seinem Periheldurchgang sich einmal 1882 II und ein andermal 1880 I trennte, wie sich daraus schließen läßt, daß sowohl 1843 I und 1882 II, als auch 1843 I und 1880 I in der Nähe des Perihels bis auf etwa $^1/_{500}$ Erdbahnhalbmesser einander nahe kommen. Wahrscheinlich ist aber auch der im Jahr 1680 erschienene Komet ein Bruchstück jenes großen Kometen, denn wenn er auch jetzt sicher über 2000 Jahre Umlaufszeit und eine ganz andere Bahnlage als jene 3 Kometen hat, so kommt er doch unweit seines Perihels den Bahnen von 1843 I und 1882 II so nahe, nämlich auf $^1/_{500}$ und $^1/_{2000}$ Erdbahnhalbmesser, daß eine frühere Zusammengehörigkeit angenommen werden muß.

Die Kometen 1680, 1843 I, 1880 I, 1882 II, sowie auch 1887 I sind der Sonne so nahe gekommen, daß sie durch die Korona hindurchgehen mußten. Der Komet 1843 I hatte hierbei eine Geschwindigkeit von 560 km in der Sekunde und eine Entfernung von der Sonnenoberfläche, die nicht ganz $^1/_5$ Sonnenhalbmesser betrug, während die Höhe der Sonnenkorona den Sonnenhalbmesser weit übertrifft. Leider ist er jedoch ebenso wie die Kometen 1880 I und 1887 I erst nach seinem Durchgang durch die Sonnennähe entdeckt worden, von den Kometen 1680 und 1882 II sind aber die vor dem Perihel angestellten Beobachtungen nicht ausreichend, um die von ihnen vor Eintritt in die Korona beschriebenen Bahnen und somit den Einfluß der Korona bestimmen zu lassen. Die Kometen 1843 I und 1882 II konnten selbst bei Tage mit bloßen Augen und zwar in geringer Entfernung von der Sonne gesehen werden, wobei sie den Eindruck eines sehr hellen Sternes machten. Ja, der Komet 1843 I ist sogar am Tage entdeckt worden, einen Tag nach seinem Periheldurchgang. Sein Schweif erstreckte sich weiter als die Entfernung des Mars von der Sonne beträgt, also auf über 250 Millionen km. Von wunderbarer Farbenpracht zeigte sich der Schweif des Kometen 1882 II.

Der einzige, mit bloßen Augen sichtbare, zu den „großen" zu rechnende Komet, welcher schon in mehreren Erscheinungen beobachtet worden ist, ist der Halleysche von 75 bis 76 Jahren Umlaufszeit, der seit der Erscheinung von 87 v. Chr. bei jeder Wiederkehr mit Ausnahme der von 912 gesehen worden ist. Während er früher immer unerwartet auftauchte, wurde für das Jahr 1759 seine Wiederkehr von Halley (1656 bis 1742; Direktor der Greenwicher Sternwarte) vorausgesagt, nachdem dieser die Kometen 1456, 1531, 1607 und 1682 alle in derselben Bahn laufend und daher vermutlich einen und denselben Kometen von 76 Jahren Umlaufszeit in seinen verschiedenen Erscheinungen darstellend erkannt hatte.

Zu den interessantesten Kometen gehört der Enckesche, nicht nur wegen seiner besonders kurzen Umlaufszeit von 3,3 Jahren, sondern namentlich wegen der von Encke (1791 bis 1865; Direktor der Berliner Sternwarte) gefundenen Verkürzung seiner Umlaufszeit um je 2½ Stunden. Als Ursache dieser Verkürzung nahm Encke ein widerstehendes Mittel an. Denn einen langsam laufenden Körper kann die Sonne eher aus seiner Bewegungsrichtung ablenken als einen schnell laufenden, die Ellipse wird durch eine Verminderung der Geschwindigkeit demnach kleiner und die Umlaufszeit kürzer. Genauere Nachrechnungen durch die Pulkowoer Astronomen von Asten und Backlund haben jedoch ergeben, daß nicht bei jedem Umlauf des Kometen eine Verkürzung der Umlaufszeit eingetreten ist, daß die Hemmung der Bewegung vielmehr nur bisweilen und wahrscheinlich mehr plötzlich erfolgte. Betreffs der Ursache darf man vielleicht an innere Vorgänge im Kometen denken, wie Abstoßung kleinerer Teile, wodurch auf die Hauptmasse eine Rückwirkung ausgeübt wurde, oder an Meteorströme, die der Komet in der Nähe seines Perihels zu durchlaufen hatte.

Die Störungen des Enckeschen Kometen durch Merkur haben das zuverlässigste Resultat für die Masse dieses Planeten geliefert.

4. Sternschnuppen. Zu den Kometen stehen in inniger Beziehung die Sternschnuppen, wie namentlich durch Schiaparelli begründet wurde. Indem dieser die zunehmende Häufigkeit der Sternschnuppen in den einzelnen Stunden der Nacht bis zum Morgen hin darauf zurückführte, daß die Erde bei ihrem Umlauf um die Sonne mit der Stirnseite eine größere Anzahl dieser Meteore auffangen müsse, als von der Rückseite her sie einholten — vorausgesetzt, daß die Sternschnuppen nach allen Richtungen gleichmäßig den Raum durcheilten —, so fand er aus dem Verhältnis der von vorn und von hinten auftreffenden Sternschnuppen die Geschwindigkeit derselben etwa 1,4 mal so groß wie die Erdgeschwindigkeit, woraus zu schließen war, daß sie in Parabeln oder, wenn sie periodisch waren, in langgestreckten Ellipsen um die Sonne liefen. Bei den alljährlich an bestimmten Tagen sichtbaren Sternschnuppen hat man es jedenfalls mit einem elliptischen Ring faust- oder sandkorngroßer Körper zu tun, den die Erde an einer Stelle schneidet. Durch die Hemmung ihrer Geschwindigkeit in unserer Atmosphäre werden die kleinen Körper in einer durchschnittlichen Höhe von 120 km über der Erdoberfläche zum Glühen gebracht. Oft braucht die Erde mehrere Tage, um den Schwarm zu durchqueren.

Durch die Perspektive scheinen die parallel nebeneinander herfliegenden Meteore eines Ringes aus einem Punkt, dem Ausstrahlungs- oder Radiationspunkt zu kommen. Nach dem Sternbild, in welchem er liegt, pflegen die Sternschnuppenschwärme oft genannt zu werden. So bezeichnet man den Meteorstrom des 9. bis 13. August als die Perseiden, die vom 19. bis 23. April als Lyriden, den vom 13. bis 14. November als Leoniden und den vom 23. November als Andromediden. Man kennt bis jetzt bereits Hunderte von Radianten. Aus dem Ort des Radianten kann man unter der Annahme der Geschwindigkeit 1,4 für die Körperchen die Lage und die Gestalt der von ihnen beschriebenen Kurve, die in diesem Falle eine Parabel sein muß, bestimmen. Unter der Annahme einer etwas geringeren Geschwindigkeit würde sich eine langgestreckte Ellipse ergeben.

Schiaparelli machte nun die wichtige Entdeckung, daß die Bahnen zweier Sternschnuppenschwärme mit den Bahnen von Kometen identisch sind, nämlich die Bahn der Perseiden mit der des Kometen 1862 III, welcher eine Umlaufszeit von 120 Jahren besitzt, und die Bahn der Leoniden mit der des Kometen 1866 I von 33,2 jähriger Umlaufszeit. E. Weiß, Direktor em. der k. k. Sternwarte in Wien, fand ferner die Uebereinstimmung der Bahnen der Lyriden und des Kometen 1861 I von 415 Jahren Umlaufszeit, sowie der Bahnen der Andromediden und des Bielaschen Kometen 1852 III von 6,6 Jahren Umlaufszeit. Die Meteorschwärme dürfen daher wohl als die Auflösungsprodukte von Kometen betrachtet werden, welche sich allmählich über die ganze Bahnkurve zerstreut haben. Da die Verteilung keine gleichmäßige sein wird, so werden die periodischen Sternschnuppenfälle in den einzelnen Jahren nicht gleich reich an Meteoren sein. So fielen die Leoniden besonders zahlreich in den Jahren 1766, 1799, 1833 und 1866, während 1899, zum Teil vielleicht wegen des ungünstigen Wetters, dann wohl auch wegen weiter fortgeschrittener Zerstreuung der Meteorwolke die Erscheinung nicht in dem erwarteten Maße eintrat. Der mit dem Bielaschen Kometen zusammenhängende Schwarm der Andromediden oder Bieliden zeigte besonders reiche Sternschnuppenfälle 1798, 1838, 1872, 1885 und 1892, zwischen welchen Jahren 6, 5, 2, 1 Umläufe des Bielaschen Kometen liegen, der sich, wie oben erwähnt, 1846 in zwei Teile spaltete und 1852 zum letztenmal gesehen wurde. Die Trümmer, mit welchen die Erde in den genannten Jahren zusammentraf, hatten sich jedoch schon lange vor 1852 von dem Hauptkometen getrennt, wenigstens war dieser, wie die Berechnung ergibt, im Jahre 1872 schon seit Monaten durch die Stelle hindurchgegangen, wo die Erde im November dem Meteorschwarm begegnete.

Die Dichtigkeit des Meteorschwarmes ist selbst bei einem sogenannten Sternschnuppenregen eine sehr geringe. So kam nach der Berechnung von H. A. Newton (1830 bis 1896; Professor der Mathematik am Yale College zu New-Haven, Conn.) während des Durchgangs der Erde durch den Hauptstrom der Bieliden im Jahre 1885, wo für einen einzigen Beobachter stündlich 75000 Sternschnuppen sichtbar wurden, doch nur ein Meteor auf einen Würfel von 32,7 km Seitenlänge.

5. Meteoriten. Während man unter der Bezeichnung „Meteore" alle in unsere Atmosphäre eindringenden Himmelskörper begreift, pflegt man, wenn schon Uebergänge vorhanden sein mögen, unter „Meteoriten" diejenigen Körper zu verstehen, welche eine viel größere Masse als die Sternschnuppen besitzen und daher, wenn auch nur, nachdem sie in hohen Luftschichten explodiert sind, in Sprengstücken, mitunter als sogenannter Steinregen auf die Erd-

oberfläche gelangen; ursprünglich mögen sie gegen 100 km im Durchmesser haben. Sie bestehen gewöhnlich aus Kieselerde und Talkerde, in selteneren Fällen aus Eisen, welches im Gegensatz zum tellurischen immer mit Nickel verbunden ist. Schleift man einen Eisenmeteoriten an und gießt eine ätzende Säure auf die Fläche, so entstehen, weil die Säure auf das Nickel anders wirkt als auf das Eisen, die nach dem früheren Wiener Mineralogen benannten Widmannstättenschen Figuren. Der bei Tucuman in Argentinien 1783 aufgefundene Meteorit hatte ein Gewicht von über 1500 kg, der von Bemdego in Brasilien von 8700 kg; das von dem Forschungsreisenden Pallas in Sibirien gefundene Meteoreisen soll ursprünglich gegen 800 kg gewogen haben. — Die Bestimmung des von einem Meteoriten vor seinem Zusammentreffen mit der Erde beschriebenen Weges ist natürlich mit großer Unsicherheit verknüpft. Aber gerade bei denen, welche eine leidlich sichere Bahnbestimmung erlaubten, hat sich eine ausgeprägte Hyperbel als Bahnkurve ergeben, was ihren kosmischen Ursprung beweisen würde. Merkwürdigerweise scheinen die Meteoriten aber doch vorzugsweise aus gewissen Gegenden des Weltenraumes zu kommen und auch an manchen Tagen des Jahres häufiger als sonst zu fallen. Letzteres würde sich, wenn es sich bestätigen sollte, natürlich nur durch die Zugehörigkeit der Meteoriten zu unserem Sonnensystem erklären lassen.

6. Gravitationsgesetz. Das Band, welches die Glieder des Sonnensystems aneinander fesselt, ist das Newtonsche Gravitationsgesetz: Jedes Teilchen Materie zieht jedes andere Teilchen Materie im direkten Verhältnis seiner Masse und im umgekehrten quadratischen Verhältnis seiner Entfernung an. Die Aufgabe der Himmelsmechanik ist es, aus diesem Gesetz die für die Bewegung der Himmelskörper sich ergebenden Folgerungen abzuleiten. Handelt es sich nur um zwei Körper, so müssen diese um ihren gemeinsamen Schwerpunkt, der eine geradlinige Bewegung von konstanter Geschwindigkeit haben kann, Kegelschnitte beschreiben; ob dies Ellipsen, Parabeln oder Hyperbeln sind, hängt nur von ihren Geschwindigkeiten ab, die sie in der gegebenen Entfernung besitzen, nicht aber von der Richtung dieser Geschwindigkeiten. Kommt es nur auf die relative Bewegung der beiden Körper an, so kann man den einen als unbeweglich und den anderen als in einem Kegelschnitt sich um ihn bewegend betrachten.

Eine unmittelbare Folge des Gravitationsgesetzes sind die drei Keplerschen Gesetze: 1. Die Planeten bewegen sich in Ellipsen, in deren einem Brennpunkte die Sonne steht. 2. Der Leitstrahl eines Planeten überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächenräume. 3. Die Quadrate der Umlaufszeiten verhalten sich wie die Kuben der halben großen Achsen der Epllisen. Genau genommen müssen die Quadrate der Umlaufszeiten noch mit den Summen der Sonnen- und Planetenmasse multipliziert werden, so daß, wenn die mit den Indices 1 und 2 versehenen Buchstaben U, m, a die Umlaufszeiten, Massen und mittleren Entfernungen der beiden Planeten von der Sonne bedeuten, die Proportion heißt:

$$U_1^2(1 + m_1) : U_2^2\,(1 + m_2) = a_1^3 : a_2^3.$$

Für die Bewegung beliebig vieler Körper gelten 1. das Schwerpunktsgesetz, wonach der Schwerpunkt eines Systems, auf das keine äußeren Kräfte wirken, sich mit unveränderlicher Geschwindigkeit in gerader Linie fortbewegt, 2. das Flächengesetz, wonach die Summe der Produkte der von den Leitstrahlen der einzelnen Massenpunkte überstrichenen Flächen in die Massen der Zeit proportional wächst, und 3. das Gesetz, daß die Zunahme der lebendigen Kraft eines Systems von Massenpunkten gleich der von den bewegenden Kräften geleisteten Arbeit ist.

Damit ist aber die Bewegung der Punkte eines Systems noch nicht bestimmt, das Problem der 3, allgemein n Körper ist, abgesehen von gewissen Spezialfällen, noch nicht gelöst. Auf einige in Spezialfällen, nämlich bei der Bewegung gewisser Jupiter- und Saturntrabanten, geltende Gesetze wurde unter 2e und 2f hingewiesen.

Bis jetzt hat sich noch nicht die Notwendigkeit ergeben, das Newtonsche Gravitationsgesetz durch Zusatzglieder u. dgl. zu verbessern, da die Bewegung des Merkurperihels, soweit sie nicht aus bekannten Ursachen erklärt werden konnte, auf die Wirkung der die Sonne umgebenden, das Zodiakallicht hervorrufenden Staubmassen zurückgeführt werden kann, und die Akzeleration der Mondbewegung in einer durch die Gezeiten herbeigeführten Verlängerung des Tages um $^1/_{100}$ Sekunde in 2500 Jahren ihren Grund haben kann. Auch haben sich keine Anzeichen ergeben, daß die Gravitation außer der im umgekehrten quadratischen Verhältnis der Entfernung erfolgenden Abnahme noch eine Absorption im Raum erführe und daß sie sich mit einer bei den Rechnungen zu berücksichtigenden Geschwindigkeit fortpflanzte. Wie der Wiener Astronom Holetschek fand, pflanzt sie sich mindestens um den Erdbahnhalbmesser in einer Sekunde fort. Daß auch die Bewegung der Doppelsterne dem Gravi-

tationsgesetz gehorcht, kann als Beweis dafür dienen, daß seine Gültigkeit sich über das ganze Universum erstreckt (vgl. den Artikel „Schwere“).

Die Beschleunigung, welche ein Körper durch die Masseneinheit (Sonne) während der Zeiteinheit (mittlerer Sonnentag) aus der Einheit der Entfernung (mittlere Entfernung der Erde von der Sonne) erfährt, wird nach Gauß (1777 bis 1855; Direktor der Sternwarte in Göttingen) mit k^2 bezeichnet und $k = 0{,}0172021$ wird die Gaußische Gravitationskonstante genannt. Es ist mit Beibehaltung der oben angegebenen Bedeutung von U, m, a $k = \frac{2a^{\frac{3}{2}}\pi}{U\sqrt{1+m}}$.

Nimmt man die Erde als den Planeten, auf welchen sich U, m, a beziehen, so hat man $k = \frac{2\pi}{U\sqrt{1+m}}$, wo jetzt U die Umlaufszeit und m die Masse der Erde bedeutet, und findet daraus obigen Wert. Wie eine leichte Rechnung ergibt, erfährt die Erde in einer Sekunde eine Beschleunigung von 6 mm nach der Sonne zu.

Bestimmt man durch das Experiment die Größe der Gravitation in irdischen Einheiten, indem man also mißt, welche Beschleunigung ein Kilogramm einem Körper in einer Sekunde aus einem Meter Entfernung erteilt, so bekommt man, weil die Beziehung zwischen astronomischer und irdischer Längeneinheit durch die Bestimmung der Sonnenparallaxe (s. unter 2d) und ebenso das Verhältnis der beiden Zeiteinheiten bekannt ist, eine Beziehung zwischen der astronomischen und irdischen Masseneinheit, man erhält die Masse der Sonne in Kilogramm ausgedrückt.

Da man andererseits durch Vergleichung des Wertes für die Anziehung eines Kilogrammes aus 1 m Entfernung mit der Beschleunigung der Schwere an der Erdoberfläche die Masse der Erde und, weil die Dimensionen der Erde bekannt sind, ihre mittlere Dichtigkeit ausrechnen kann, so wird jene Aufgabe, die Größe der Gravitation in irdischen Maßeinheiten auszudrücken, in der Regel als die Bestimmung der mittleren Erddichte bezeichnet.

Die hauptsächlichsten bisher dazu verwandten Methoden sind folgende:

1. Man beobachtet die Ablenkung des Lotes an den zwei entgegengesetzten Seiten eines Berges, dessen Masse natürlich bestimmt werden muß, und vergleicht die Anziehung des Berges mit der der Erde.

2. Man bestimmt die Anziehung eines Berges durch Beobachtung der Schwingungen eines Pendels auf der Spitze und an einem Ort der Ebene unter derselben geographischen Breite.

3. Man bestimmt die Anziehung einer Wassermasse, indem man ein Pendel über einem Teich, sowohl wenn er gefüllt wie wenn er geleert ist, schwingen läßt.

4. Durch Pendelschwingungen an der Erdoberfläche und in der Tiefe eines Schachtes bestimmt man die Anziehung der zwischenliegenden Schicht.

5. Ein an seinem Ende mit Metallkugeln versehener, an einem Faden aufgehängter Wagebalken (Drehwage) wird aus seiner Gleichgewichtslage gebracht, indem man große Kugeln von bekannter Masse den Kugeln des Wagebalkens von der Seite nähert; oder man beobachtet die Schwingungen des Wagebalkens bei entfernten und bei genäherten Massen.

6. Eine vertikale, an ihren Enden mit Kugeln versehene, nahe über ihrem Schwerpunkt unterstützte Stange wird durch Massen, die jenen Kugeln von der Seite genähert werden, aus ihrer Gleichgewichtslage gebracht.

7. Auf einer äußerst feinen Wage wird eine Masse einmal unter dem bloßen Einfluß der Erde, das andere Mal, wenn eine schwere Masse unter die eine Wagschale gelegt ist, gewogen. Oder es hängen an jedem Wagearm zwei Schalen in etwa 2 m Entfernung, die eine über der anderen. Zwischen den beiden Wagschalen auf jeder Seite befinden sich große Massen, durch welche die Aufhängedrähte der Wagschalen hindurchgehen. Wird die Wage zum Einspielen gebracht, wenn in die rechte obere und linke untere Wagschale Gewichte gebracht werden, so wird ein Ausschlag erfolgen, wenn darauf die Gewichte in die linke obere und rechte untere Wagschale getan werden, weil dann die großen Massen ihre Wirkung auf die beiden Gewichte im entgegengesetzten Sinn äußern.

Für die mittlere Erddichte ergab sich nach den aufgeführten Methoden der Wert 5,5; d. h. die Erde wiegt 5,5-mal soviel wie eine gleich große Wasserkugel.

Hinsichtlich der Größe der Gravitation ergab sich das Resultat: Die Masse eines Kilogramms erteilt einem um 1 m entfernten Körper in einer Sekunde eine Beschleunigung von 0,068 Millionstel Millimeter.

7. Stabilität des Sonnensystems. Das Sonnensystem besteht im wesentlichen in seinem heutigen Zustand schon seit so vielen Jahrbillionen, daß wir auch für weitere Jahrbillionen seine Dauer annehmen möchten, wenn wir nicht gar glauben wollen, es habe in seiner Entwickelung (betr. der verschiedenen Hypothesen vgl. den Artikel „Kosmogonie“) einen alle Zeiten überdauernden Zustand erreicht. Es drängt sich die Frage auf: Wodurch wird die lange, vielleicht ewige Dauer des Sonnensystems garantiert, während doch die Bahnen der Planeten infolge der Störungen, die sie aufeinander ausüben, sich fortwährend ändern und die Stellung, die heute die Planeten zueinander einnehmen, sich nie wiederholt? Gerade in dem letzteren Umstand glaubte man bis

Ende des vorigen Jahrhunderts die Lösung der Frage zu finden.

Die Inkommensurabilität der Umlaufszeiten der Planeten, sagte man, hindert diese, eine früher eingenommene gegenseitige Lage wiederum einzunehmen und genau dieselben Störungen aufeinander auszuüben wie früher, so daß sich dieselben nicht allzusehr anhäufen können. Die Lücken in dem Schwarm der kleinen Planeten und im Ringsystem des Saturn gerade an den Stellen, wo ein Himmelskörper ein rationales, durch kleine ganze Zahlen ausdrückbares Verhältnis der Umlaufszeiten mit einem störenden Körper haben würde, dachte man sich durch die Beseitigung der früher dort befindlichen Körper entstanden. Tisserand (1845 bis 1896; Direktor der Pariser Sternwarte) und Gyldén (1841 bis 1896; Direktor der Sternwarte zu Stockholm) haben aber gezeigt, daß auch in dem Fall kommensurabler Umlaufszeiten die Störungen sich nicht in dem Maße häufen können, daß der Bestand des Systems gefährdet würde. So üben Jupiter und Saturn, weil ihre Umlaufszeiten sich nahe wie 2:5 verhalten, sie also nach fünf Umläufen des ersteren wieder nahe dieselbe Stellung zueinander einnehmen wie vorher, eine Störung von einer Periode von 930 Jahren aufeinander aus, wobei Jupiter bis auf 20′ und Saturn bis auf 49′ von seinem mittleren Ort entfernt wird, der eine im Sinn einer Beschleunigung, der andere im Sinn einer Verzögerung. Immerhin bleibt die Störung eine periodische. Kommensurable Umlaufszeiten kommen auch bei den Saturnmonden Mimas und Tethys, sowie Enceladus und Dione vor, wodurch die unter 2f angegebenen Struveschen Gesetze bedingt sind. Jene auffälligen Lücken dürften daher schon bei der Bildung der Himmelskörper entstanden sein, wie wenn die Materie sich dort nicht hätte zusammenballen können.

Wie Laplace bewiesen hat, kann durch die Störungen, welche die Planeten aufeinander ausüben, die große Achse einer Planetenbahn nur periodische Aenderungen um einen Mittelwert herum erleiden, welch letzterer allerdings selbst nicht konstant ist, doch geht seine Aenderung nur sehr langsam im Vergleich zu jenen vor sich, sie ist von der 2. Ordnung der Massen, während jene von der ersten sind. Dasselbe ist mit den Exzentrizitäten und Neigungen der Fall. Poisson (1781 bis 1840; Akademiker in Paris) hat weiter bewiesen, daß jene langsamen Aenderungen wiederum um einen Mittelwert oszillieren, der nun einer noch viel langsameren Aenderung unterworfen ist. Da aber gerade die drei Bahnelemente: große Achse, Exzentrizität und Neigung von Wichtigkeit für das Bestehen eines Planeten und für die auf ihm herrschenden klimatischen Bedingungen sind, nicht aber die in der Tat sich stark ändernden Richtungen der großen Achse und der Knotenlinie, so spricht man von der Stabilität des Sonnensystems, die also bis zu jenem Grad der Genauigkeit erwiesen ist.

Aber auch wenn sie in vollster Strenge bewiesen werden könnte, so würden hierbei die Himmelskörper doch immer nur als Massenpunkte betrachtet worden sein, die sich im leeren Raum nach dem Newtonschen Gravitationsgesetz anziehen. Die Planeten und ihre Monde sind jedoch keine Massenpunkte, sondern ausgedehnte, ihrer Gestalt und Dichteverteilung nach unregelmäßig gebildete Körper, die außer der Gravitation auch noch anderen Kräften unterworfen sind, z. B. dem Lichtdruck seitens der Sonne und magnetischer Anziehung, denn wie die Erde werden auch sie von magnetischen Strömen durchflossen sein. Außerdem aber ist der Raum, welchen die Planeten durchmessen, auch nicht absolut leer, Meteore, Staubmassen und Gase, zum Teil vielleicht von aufgelösten Kometen herrührend, vermindern die Geschwindigkeit jener Körper, so daß ihre Bahnen enger und enger werden, bis sie sich mit der Sonne vereinigen. Das Sonnensystem kann daher, selbst wenn der bisherige Stabilitätsbeweis nicht bloß eine Annäherung wäre, nicht als ein alle Zeiten überdauernder Mechanismus betrachtet werden. Es hat nicht von Ewigkeit her bestanden und wird auch nicht in Ewigkeit bestehen.

Literatur. ***Newcomb-Engelmann***, *Populäre Astronomie, herausgegeben von Kempf. Leipzig 1911.* — ***Newcombs*** *Astronomie für jedermann, bearbeitet von Schorr und Graff. Jena 1910.* — ***Littrow-Weiss***, *Wunder des Himmels. Berlin 1897.*

P. A. Secchi, *Die Sonne, herausgegeben von Schellen. Braunschweig 1872.* — ***E. Pringsheim***, *Physik der Sonne. Leipzig 1910.* — ***E. Neison***, *Der Mond und die Beschaffenheit und Gestaltung seiner Oberfläche. Braunschweig 1881.* — ***J. Franz***, *Der Mond. Leipzig 1906.* — ***C. E. Delauney***, *Théorie du mouvement de la Lune. Paris 1860 bis 1867.* — ***G. V. Schiaparelli***, *Sulla rotazione di Mercurio. Astronomische Nachrichten, Bd.* **123**. *Nr. 2944, 1889.* — ***Derselbe***, *Considerazioni sul moto rotatorio del Pianeta Venere. Rendiconti del R. Istituto Lombardo. Serie II, Vol.* **23**. *Milano 1890 (s. auch die eingehende Besprechung und Kritik von Wislicenus in der Vierteljahrsschrift der Astronomischen Gesellschaft, Jahrg.* **27**, *Leipzig 1892).* — ***Derselbe***, *Osservazioni astronomiche e fisiche del Pianeta Marte. 6 Memorie. Atti della R. Accademia dei Lincei. Roma 1878 bis 1899 (Mitteilung auch in „Himmel und Erde", Jahrg.* **1**, *Berlin 1889.)* — ***Derselbe***, *Entwurf einer Astrono-*

mischen Theorie der Sternschnuppen, herausgegeben von ***Boguslawski****. Stettin 1871.*

N. Copernicus, *De Revolutionibus Orbium caelestium, herausgegeben von der Thorner Copernicus-Gesellschaft. Thorn 1873.* — **W. Olbers,** *Abhandlung über die leichteste und bequemste Methode, die Bahn eines Kometen zu bestimmen. Neu herausgegeben von* ***Encke****. Weimar 1847.* — **C. F. Gauss,** *Theoria motus corporum coelestium. 1809. Deutsch von* ***Haase****. Gotha 1877.* — **Th. v. Oppolzer,** *Bahnbestimmung der Kometen und Planeten. Leipzig 1882.* — **J. Bauschinger,** *Bahnbestimmung der Himmelskörper. Leipzig 1906.*

J. Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica. London 1687. Deutsch von* ***Wolfers****. Berlin 1872.* — **P. S. Laplace,** *Mécanique céleste. 1799 bis 1825.* — **Derselbe,** *Exposition du système du monde. 1796 (beide Werke neu herausgegeben von der Pariser Akademie in den „Oeuvres complètes“ de* ***Laplace****.)* — **F. Tisserand,** *Traité de Mécanique céleste. Paris 1889 bis 1896.* — **J. C. Maxwell,** *Essay on the stability of the motion of Saturns rings. 1859.* — **G. A. Hirn,** *Mémoire sur les anneaux de Saturne. Straßburg 1872.* — **H. Seeliger,** *Theorie der Beleuchtung staubförmiger kosmischer Massen, insbesondere des Saturnrings. München 1893.* — **H. Struve,** *Beobachtung der Saturnstrabanten, Ser. II, Vol.* **11** *der Pulkowoer Publikationen, 1898. Enthält die Struveschen Gesetze der Bewegung von Enceladus und Dione, sowie Mimas und Tethys (Mitteilung auch in den Astronomischen Nachrichten, Bd.* **125***, Nr. 2983 bis 2984. 1890).*

O. Knopf.

Sorby

Henry Clifton.

Geboren am 10. Mai 1826 zu Woodbourne bei Sheffield; gestorben am 9. März 1908. Als reicher Privatmann wandte er sich schon frühzeitig aus Neigung dem Studium der Naturwissenschaften zu und zeichnete sich bald auf dem Gebiete der Geologie und der Mikroskopie aus. 1857 wurde er Mitglied der Royal Society of London, die ihm 1869 die Wollaston-Medaille verlieh. Seit 1882 war er Präsident des Firth College zu Sheffield.

In mehreren kleineren Arbeiten (1851 bis 1856) hatte Sorby als erster den großen Vorteil der mikroskopischen Untersuchung von Dünnschliffen im durchfallenden Lichte erkannt. Unabhängig von ihm hatte zwar der Privatgelehrte Oschatz in Berlin gleichfalls die Wichtigkeit von Dünnschliffen auf mehreren Naturforscherversammlungen (1852 und 1854) gezeigt, ohne jedoch tiefergehendes Interesse zu erwecken. Erst durch Sorbys Abhandlung „Microscopical structure of crystals indicating the origin of minerals and rocks“ (1858) wurden weitere Kreise auf die neue Untersuchungsmethode aufmerksam. Strukturelle und genetische Verhältnisse von Mineralien und Gesteinen, die sich bislang dem Blick des Forschers entzogen, waren nunmehr einer genauen und gründlichen Beobachtung leicht zugänglich gemacht. Sorby selbst wies auch durch mehrere Abhandlungen den Weg, die neue Untersuchungsmethode auf organische Präparate anzuwenden, und leistete dadurch auch der Botanik und Zoologie unschätzbare Dienste.

Literatur. *The Encyclopaedia Britannica (11. Ed.),* 25, *S. 431.* — **K. v. Zittel,** *Geschichte der Geologie.*

K. Spangenberg.

Sowerby

James.

Er wurde am 21. März 1757 in London geboren, studierte dort an der Royal Academy. Seine Beschäftigung mit Blumenmalerei führte ihn zum Studium der Botanik. Durch die naturgetreue Wiedergabe und Sorgfalt, durch die sich seine Werke auszeichneten, zog er bald die Aufmerksamkeit der Botaniker auf sich. So erhielt er Aufträge, verschiedene botanische Arbeiten zu illustrieren. Sein Hauptwerk ist die English Botany, die 1790 bis 1814 in 36 Bänden erschien. Auch auf zoologischem, mineralogischem und paläontologischem Gebiete betätigte er sich in dieser Hinsicht mit großem Erfolge. Die Versteinerungen des Silurs, des Jura und der Kreide wurden z. T. von ihm gezeichnet und beschrieben. Von großer Bedeutung für die Kenntnis der fossilen Mollusken ist sein Werk: Mineral Conchology of Great Britain, das er im Jahre 1812 begann und das später von seinem Sohne James de Earle Sowerby (1822 bis 1845) fortgesetzt wurde. Dieser illustrierte Katalog aller in Großbritannien vorkommenden Mollusken enthält in 6 Bänden 604 kolorierte Tafeln mit erläuterndem Text. Weiter bearbeitete er fossile Cephalopoden. Von seinen mineralogischen Werken mag erwähnt werden: British Mineralogy (London 1802); Exotic Mineralogy (London 1811 bis 1817). Er war Mitglied der Linnean Society und der Geological Society (seit 1807). Als Porträt- und Landschaftsmaler ist er ebenfalls bekannt. Er starb am 25. Oktober 1822 in Lambeth.

Literatur. *Dictionary of National Biography, Vol.* 53, *S. 305 bis 307.*

O. Marschall.

Sozialanthropologie.

I. Begriff und Umfang. II. Ergebnisse. 1. Sozialanthropologische Untersuchungen an sogenannten Naturvölkern. 2. Solche an Kulturstaaten: a) An einzelnen sozialen Schichten oder Klassen: untere — Kriminalanthropologie — mittlere — Familienanthropologie — oberste — Kastenanthropologie. b) An Völkern und Staaten. 3. Rassenhygiene.

Der jüngste Zweig der gesamten anthropologischen Wissenschaft ist die Sozial-

anthropologie, die erst auf etwa 25 Jahre zurückblicken kann, wenn man von einigen unbedeutenden Vorläufern und einigen zunächst völlig verkannt gebliebenen Werken absieht. Dies und ihre besonders engen Beziehungen zu anderen Disziplinen (s. u.), von denen sie öfter nur als Grenzgebiet aufgefaßt wurde, haben es verursacht, daß die Sozialanthropologie auf keine Weise als systematisch in ihrer Gesamtheit durchgearbeitet gelten kann. Es fehlt noch mancherorts an Materialbeschaffung, an anderen Stellen an Klärung einzelner Begriffe oder konsequentem Ausbau (gerade auf diesem Gebiet wird besonders viel und oft schädliche Dilettantenarbeit geliefert). So ist es wohl heute einfach noch unmöglich, hier eine systematische Darstellung der gesamten Sozialanthropologie zu geben, Sozialanthropologie als fertiges Gebäude zu umreißen, und es dann mit dem vollen, hineingehörigen Inhalt zu füllen. Man muß sich einstweilen mit recht fragmentarischer Darstellung begnügen, manches mehr als provisorisches Programm und inhaltlich skizzenhaft, vieles auch ungeklärt im Streite der Meinungen wiedergeben.

I. Begriff und Umfang.

Sozialanthropologie kann man wohl auffassen als die Lehre von den anthropologischen Erscheinungen an den sozialen Gruppen des Menschen. Dabei ist „anthropologisch" im Sinne von physisch-(somatisch-)anthropologisch (vgl. die allgemeine Definition Bd. I S. 483) und bezüglich des Umfanges als Anatomie, Physiologie, Pathologie, kurz Gesamtbiologie verstanden; unter „sozialen Gruppen" sind hier alle gesellschaftlichen Verbände innerhalb der Menschheit gemeint, Stammesorganisationen, einfachste und kompliziertesten Staaten, ebenso aber innerhalb solcher je einzelne soziale Schichten oder Klassen oder Kasten, ja auch innerhalb dieser einzelne Familiengruppen oder Großfamilien, wo diese soziale Sonderbildungen sind. Die engste „Familie" als solche sieht Verfasser im Gegensatz zu anderen Autoren, z. B. Plötz (1904), nicht als „soziale" Gruppe an, vielmehr als rein biologische Einheit; erst größere, durch Sitte oder Gesetz oder gemeinsame Not oder Gunst zusammenbleibende Familienverbände, Großfamilien, Sippen, „Geschlechter" sind soziale Einheiten. Eine scharfe Grenze existiert allerdings auf keine Weise! Und die Untersuchung anthropologischer Erscheinungen an vielen sozialen Gruppen muß als spezielles Studienobjekt gerade, und öfters fast ausschließlich, die „Familie" vornehmen. Die Anwendungsgrenze des Begriffes „Gesellschaft" (soziale Gruppe) hängt von deren Definition ab; der Begriff ist keinesfalls ein naturwissenschaftlicher, vielmehr ein kulturwissenschaftlicher im Sinne Rickerts (Tübingen 1910 2. Aufl.), auch wenn man gerade hier eine Gegensätzlichkeit oder gar ein sich Ausschließen der beiden Gebiete leugnen muß. So ist die Erläuterung jenes Begriffes nicht mehr Inhalt der Anthropologie, er wird übrigens hier soweit als möglich zu fassen sein. Es sei auf die Schriften von Soziologen, Nationalökonomen und Staatsrechtlern verwiesen: Eleutheropulos (1904), dann die bekannten Werke von Gierke, Jellinek, Schäffle, R. Schmidt, Spencer, Stammler und vielen anderen.

Das Leben, die Lebensäußerungen, die Regeln und Gesetze der sozialen Körper als solcher zu untersuchen, ist nicht Aufgabe der Anthropologie, das sind soziologische, wirtschaftliche, rechtliche, auch historische und ethnologische Probleme. Aber die genannten Disziplinen können nicht alle Fragen auch nur zu lösen versuchen. Sehr viele Fragen in jenem Leben, das aus dem sozialen Zusammensein von Gruppen von Menschen entsteht, haben eine rein biologische, d. h. anatomische und physiologische Seite (bezw. anatomische und pathologische, was von ersterem kein qualitativer Unterschied ist). Soviel wird man wohl allgemein zugeben müssen, wenn auch noch viele diese anthropologische Seite der soziologischen Probleme leugnen und — irrtümlich — meinen, sie betreffe stets nur das „Einzelindividuum" innerhalb der sozialen Gruppe, nicht diese als solche. Wieweit die Anthropologie der betreffenden Gruppen über die des Einzelindividuums hinausgeht, wo da die Grenze ist, ist vielleicht noch nicht immer ganz ausgemacht — aber die Berechtigung der folgenden Fragestellungen, das Recht, diese Probleme aufzurollen, wird man allerseits zugeben müssen, ebenso daß diese Fragen nur auf naturwissenschaftlichem Boden Bearbeitung und Beantwortung finden können. Die Fragen sind etwa folgende:

Wirkt die Zugehörigkeit zu einer sozialen Gruppe (Staat, Klasse, soziale Schicht usw.) als solche etwa auf die körperliche Beschaffenheit (einschließlich der körperlichen Grundlage des Geistigen) der Mitglieder dieser Gruppe erbändernd ein? („idiokinetisch" nach Fr. Lenz 1912). — Gerade die Aenderung der Erbmassen, der erblichen Einheiten der „Linien" (Johannsen), d. h. der Geschlechterfolgen, ist das anthropologische Problem. Wie die Zugehörigkeit zu sozialen Gruppen den Einzelmenschen während seines individuellen Lebens beeinflußt, das untersucht die Hygiene (und Medizin überhaupt), even-

tuell auch auf zwei Generationen eingehend, wenn sie den Einfluß des mütterlichen Körperzustandes (Gesundheit, Mutterarbeit usw.) auf das Kind mitberücksichtigt; dagegen die etwaige Beeinflussung der Erbqualitäten zu untersuchen, ist der Anthropologie vorbehalten und zwar umfaßt, da es sich um dauernd sich kreuzende „Linien" in einer Gruppe handelt, diese Untersuchung nicht nur die Gesamtheit der Einzellinien, sondern tatsächlich auch deren Kombination oder deren Resultante, sie ist wirklich Anthropologie „der Gruppe" als solcher. Dabei wird sie allerdings auch alle individuell erscheinenden Beeinflussungen (Aenderungen anatomischer oder physiologischer Merkmale) studieren müssen, sie können erbliche Beeinflussungen (idioplasmatische, Lenz) verdecken oder aber Symptome, oder endlich Ursachen solcher (Idiokinese) sein.

Die Frage also nach der etwaigen Aenderung der Erbqualitäten der menschlichen Linien, deren Glieder eine bestimmte soziale Gruppe bilden, durch eben diese Zugehörigkeit ist eine anthropologische Aufgabe; die Entstehung, der Ablauf usw. der die Aenderung hervorrufenden Momente zu studieren, ist soziologisches (nationalökonomisches, historisches) Werk, endlich ihren Einfluß auf den Lebensspielraum, Gesundheitszustand des einzelnen Gruppenmitgliedes zu untersuchen, wird der (Individual- und Sozial-) Hygiene (Medizin) zukommen.

Eine zweite Frage aber ergibt sich aus einer Art Umkehrung der ersten: Sollte etwa die Resultante der erblichen Eigenheiten aller eine soziale Gruppe zusammensetzenden Menschen — d. h. aber nichts anderes als die anthropologischen (anatomischen und physiologischen) Merkmale der Gruppe — den Ablauf mancher oder aller Lebensäußerungen dieser Gruppe selbst beeinflussen, zum Teil wenigstens bestimmen, ganz oder zum Teil verursachen können?

Die soziologische (nationalökonomische, historische usw.) Forschung versucht, die Lebenserscheinungen der Gruppen zu analysieren, aus anderen zu erklären, als Ursachen wieder anderer darzutun; oft wird das nicht restlos gelingen; sollte ein Faktor in solchen Analysen, ein Kausalmoment im wirklichen Geschehen die angeborene und erbliche, eventuell unveränderliche anthropologische Eigenheit des menschlichen Materials der Gruppe sein? Es wären das dann dessen Rasseneigenheiten im weitesten Sinne dieses Wortes. Man denke — um ein fiktives Beispiel zu benützen — zwei geographisch weit auseinander lebende soziale Gruppen, etwa obere Gesellschaftsschichten, beeinflußten durch besondere, ihnen eigentümliche Lebensweise (üppigste, einseitige, eventuell direkt keimschädigende Ernährung), ihre Fortpflanzungsfähigkeit dahin, daß sie stark geschädigt werde; die eine Gruppe bestehe dabei aus einer Rasse, die an sich kolossal fruchtbar, die andere aus einer, die schon an sich nicht besonders stark fruchtbar wäre — diese angeborene Verschiedenheit würde dann geradezu über das Schicksal der betreffenden Gruppen entscheiden: die eine ginge rasch völlig zugrunde, stürbe aus, die andere bliebe, zwar geschwächt an Zahl, vielleicht doch dauernd bestehen. Weiter ist zu bedenken, daß auch eine bestimmte geistige Veranlagung erbliches Rassegut ist (s. u.) —. Soziale Einrichtungen, die Form, die Regelung vieler sozialer Gruppen (Staaten, auch Klassen, Kasten) sind aber bewußt und unbewußt von den betreffenden Menschen geschaffen worden, also von dieser geistigen Veranlagung mitabhängig, wobei die geistige Veranlagung der Gesamtgruppe die Resultante aus den einzelnen Veranlagungen ist, die vielleicht — etwa durch Rassenmischung — recht verschieden sind (dabei dürfen natürlich die anderen Faktoren, die nichtanthropologischen, wie Umwelt, Schicksale, Entlehnungen, Nachbarschaft, „Zufall", aber auch durch Schicksal und Erziehung bedingte „Ausgestaltung" der geistigen angeborenen Anlage nicht vergessen oder zu gering angeschlagen werden). — Mindestens als Frage demnach muß wohl jeder diese Betrachtung berechtigt heißen, ob also die erbliche Natur („Rasse") der eine soziale Gruppe bildenden Menschen bestimmte Lebensäußerungen oder das Schicksal eben dieser Gruppe beeinflußt oder mitbedingt. Und die Untersuchung dieses Problems ist eine anthropologische — nur die Anthropologie kann über die erbliche Beschaffenheit, die Besonderheiten usw. der einzelnen zusammenlebenden Menschen (besser „Linien" oder jeweilige lebende Repräsentanten von „Linien") Angaben machen. Gleichzeitig muß allerdings die „Kulturwissenschaft" die betreffenden Lebensäußerungen der Gruppe dem Anthropologen dartun und die sie bedingenden oder zu bedingen scheinenden Faktorenreihen sozialer Natur aufdecken — meist müssen dann wohl soziale und anthropologische Momente gegeneinander abgewogen werden, beide werden zugleich wirksam sein. — Endlich wird auch hier neben der Soziologie unter gewissen Umständen die (Individual-)Hygiene in Betracht kommen. Sie wird gelegentlich zeigen können, daß und wie einzelne Umstände das Leben der Einzelindividuen günstig oder ungünstig beeinflussen, ob und wie diese Einflüsse geändert werden könnten — Lebensbeeinflussungen, die eventuell ebenfalls auf den Ablauf von Vorgängen am

betreffenden sozialen Körper wirken. Aber man bemerkt den Unterschied: hier kommen nur auf die Einzelpersonen (eventuell auf alle Einzelpersonen) wirkende Umstände in Betracht, die die ererbte Anlage nicht ändern — die Umstände können auch ohne beabsichtigtes (hygienisches) Eingreifen einmal anders werden — jene dagegen bleibt; oder wenn sie sich ändern sollte („idiokinetisch", „Keimesänderung" — s. o.) so geht das auf ganz andere, hochkomplizierte, indirekte Weise vor sich und wirkt erst auf die folgenden Generationen.

Die behandelten zwei Fragen dürften wohl die gesamte Sozialanthropologie umschließen. Eine Gliederung des Stoffes ist auf anthropologischem Boden noch nicht möglich: etwa in einem allgemeinen Teil wirklich allgemeine, stets geltende Gesichtspunkte oder Regeln darzutun, im speziellen dann die einzelnen anthropologischen Merkmale oder Gruppen zu verfolgen, ist heute noch ganz aussichtslos. Man ist noch zu sehr auf dem Stadium der Materialbeschaffung. So muß die Sozialanthropologie einfach die einzelnen bestehenden (vom Soziologen zu nennenden und nach ihren Lebensäußerungen zu charakterisierenden) sozialen Gruppen der Reihe nach auf das Zutreffen jener Fragen untersuchen, innerhalb jeder Gruppe der Reihe nach die einzelnen Lebensprozesse.

Man könnte etwa folgendermaßen vorgehen: Man untersucht die Sozialanthropologie folgender Gruppen, wobei jeweils beide obige Fragen: Einfluß der sozialen Umwelt (Gruppenzugehörigkeit bezw. Gruppencharakter) auf die Gesamtheit der betreffenden Individuen und Einfluß der anthropologischen Natur der Individuen auf ihre Gruppe berücksichtigt werden müssen:

1. Anthropologie sozialer Gruppen mit einfachen (biologisch offenbar wenig wirksamen) sozialen Organisationen (Gruppen bei sogenannten „Naturvölkern" — eine Grenze und feste Definition von „Naturvolk" gibt es nicht!).

Teilweise ist je ein ganzer Stamm (hier = Staat) die betreffende Gruppe, teilweise beginnen sich sozial und biologisch different wirkende Sonderungen (Stände — Adel) zu bilden.

2. Anthropologie sozialer Gruppen mit komplizierter sozialer Organisation (Gruppen in Kulturstaaten und ganze solche. — Der Uebergang nach 1. ist natürlich ein ganz fließender mit allen Zwischenstufen).

Hier sind getrennt zu untersuchen:

a) engere Gruppen: Klassen oder Schichten, Stände, Kasten (lokal verschieden). Da werden Einzelerscheinungen herauszugreifen sein: Sozial untere Schichten: unterste — Vagabunden, Verbrecher — „Kriminalanthropologie" („Degenerationslehre") s. u.; mittlere Schichten; obere Schichten: Adelsgruppe, „talentierte Familien" (das Genie).

Hier zeigt es sich besonders, wie die „Familie" je der Träger der „Linien"-erbanlage ist, so daß als das Einzelobjekt dieser sozialanthropologischen Untersuchung die „Familie" dienen muß. Man spricht mit Recht von „Familienanthropologie" und versteht darunter den Teil der Sozialanthropologie, der die Erbqualitäten der Familien, also die Kreuzungserscheinungen der Einzellinien untersucht.

b) Die umfassenden Gruppen: die Staaten. Die Sozialanthropologie, die das soziale Gebilde „Kulturstaat" untersucht, wird bezüglich der ersten Frage (Wirkung von sozialer Gruppe auf die betreffenden Menschen) oft als „politische Anthropologie" bezeichnet, man kann sagen, die Lehre vom Einfluß des Lebens als „Zoon politikon" auf die anthropologischen Merkmale. Die andere Frage betrachtet die Bedeutung der Rassenmerkmale der Glieder eines Staates auf dessen Schicksal oder dessen Geschichte: man spricht von „historischer Anthropologie". Die Anthropologie will also da den Ablauf der historischen Ereignisse, Aufgang und Niedergang von Kulturen, Völkern, Staaten erklären helfen; im Rahmen obiger Definitionen ist das ohne Zweifel ein berechtigtes — und man darf wohl heute schon sagen erfolgreiches Beginnen (sehr oft nennt man die Versuche aus der anthropologischen Zusammensetzung eines Volkes dessen Schicksal mitzuerklären, kurzweg „Rassentheorie").

Als etwas ganz besonderes muß dann im Anschluß an die Sozialanthropologie die „Eugenie" oder „Rassenhygiene" genannt werden. Wenn obige Definitionen und Erläuterungen des Inhaltes und Wesens der „Sozialanthropologie" deren deutliche materielle und methodische Abgrenzung gegen Soziologie, Nationalökonomie, Geschichte und Ethnologie, andererseits die gegenseitigen engen Beziehungen und das zur restlosen Erklärung vieler Erscheinungen einfach notwendige Zusammenarbeiten aller dieser wohl zur Genüge dartun, muß über das Verhältnis zur Hygiene noch ein weniges beigefügt werden. Wie oben angedeutet und wie bekannt, untersucht die „Hygiene", d. h. im allgemeinen stets die Individualhygiene, die Bedingungen des Lebens-Optimums für das Einzelindividuum und die Maßnahmen, diese herbeizuführen (s. Lehrbücher der Hygiene.)

Die „soziale Hygiene" tut genau dasselbe für die je in einer sozialen Gruppe zusammenlebenden Individuen; auch sie

kümmert sich vor allem um die Einzelpersonen; der Zusatz „soziale" bedeutet hier nur eine Beschränkung auf bestimmte Personenkreise, nämlich solche, die in irgendwelchen sozialen Verbänden leben und dann eine Beschränkung auf bestimmte Einwirkungen, nämlich soziale (Städtewohnen und alles was damit zusammenhängt, Schulhygiene usw.). Was aber studiert und geschützt wird, sind die Einzelindividuen (vgl. Grotjahn 1904 [geringe Abweichungen]). Aller dieser Hygiene ist also nicht nur das Studium der objektiv gegebenen Zustände eigen, sondern sie wertet sie bezüglich des Zieles einer optimalen Lebenserhaltung und -führung; und sie macht Vorschläge und trifft Maßnahmen, auf Grund dieser Werturteile zu ändern, nach ihrer Meinung zu bessern. Man könnte direkt von einer therapeutischen Seite der Hygiene sprechen; sie übt eine Therapie an den Zuständen, Verhältnissen usw. aus. In jüngster Zeit wird nun auch bezüglich der „Linien", d. h. Erbstämme, Familienketten, ähnliches versucht. Die Hygiene soll auch „optimale" (denkbar beste) Bedingungen für die „Linien" (Familienstämme) studieren und Maßnahmen zu ihrer Herbeiführung angeben und treffen. Auch hier soll also gewertet werden, neben das Erkennen soll das Handeln treten; dabei ist vorausgesetzt, daß das Wohl der „Linie" dem des Einzelindividuums vorgeht. Ein guter Name für diese Seite der Hygiene existiert nicht. Der Name „Rassenhygiene" ist der gebräuchlichste, von Ploetz eingeführt. Aber heute wird doch fast allgemein (und meiner Meinung nach mit Recht) Rasse im Sinne von Systemrasse angewandt und das will der Begriff Rassenhygiene ausdrücklich nicht — so führt er außerordentlich oft irre. „Rassenhygiene" ist also nicht die Hygiene einer bestimmten „Rasse" innerhalb menschlicher Sozialgruppen (Staat, Klasse usw.), sondern will hygienisch die rassigen Eigenschaften aller Gruppenglieder studieren bezw. pflegen, d. h. alle erblichen als gesund und normal erkannten, oder als „gut" bewerteten Merkmale; dabei können (bei der fast überall vorhandenen Mischung der (System-)Rassen) die Eigenheiten einer speziellen Rasse als die „besseren" gelten und es kann daher in diesem Falle wirklich nach bestimmter (System-) „Rasse" hygienisch gearbeitet werden — (ja de facto wird sich das meistens von selber so ergeben!) — aber der Terminus „Rassenhygiene" als solcher will das nicht! — (im übrigen sind System-Rasse und „Linien" bezw. Familienstämme keine Gegensätze, sondern jene ist eine Gruppe sich gleichender Linien). Die englische Literatur spricht von „Eugenic", der Lehre von den mit guten erblichen Anlagen Geborenen; man versteht dabei unter Eugenic einerseits die Lehre von den betreffenden Anlagen und ihren Beziehungen zur gesamten Umwelt, also auch zur sozialen, d. h. Sozialanthropologie — andererseits die Lehre von den optimalen Bedingungen und Maßnahmen für diese „guten" Linien. Beides ist aber zu trennen. Man könnte den das letztere Gebiet umfassenden Teil Phylo-Hygiene nennen, Hygiene der Stämme also (auch das Wort Idio-Hygiene — Idioplasma im Sinne der Zoologen und Botaniker; Idioplasma, Idiokinese bei Fr. Lenz 1912: also „Hygiene der Erblinien" — wäre zu wagen). Einstweilen wird das Wort „Rassenhygiene" aber das gebräuchlichste sein, es wird auch im folgenden verwandt werden. Sie würde also nicht studieren, wie sich die Linien verhalten, sozial beeinflußt und beeinflussend (das tut die Sozialanthropologie), sondern sie untersucht, wie sie zu ihrer dauernden Erhaltung am besten sich verhalten würden und was man unter gegebenen sozialen Verhältnissen zur Herbeiführung dessen tun könnte oder sie tut das wirklich. In letzterem Falle würden wenigstens einige Schritte schon nicht mehr Hygiene, auch nicht mehr nur deren therapeutische Seite sein, sondern bereits Züchtungslehre, praktische Zuchtkunde. — Für das Gedeihen als gut bewerteter Stämme sind natürlich nicht nur soziale Umweltverhältnisse, sondern auch das Vorhandensein „schlechterer" Stämme, die hereinkreuzen und mit „schlechteren" Erbanlagen belasten können und die den Lebensspielraum der „Guten" einengen, von Bedeutung als Minderer des Optimums — so muß konsequenterweise eine Hygiene der Erblinien diese werten, dann teils positiv züchten, teils von der Fortpflanzung ausmerzen (über Möglichkeit, Berechtigung, Notwendigkeit ist damit nichts ausgesagt; s. aber Fischer 1910).

Diese ganze Darstellung, vor allem die Skizzierung des Wesens der Sozialanthropologie und ihrer Beziehungen zu anderen Disziplinen nahm ihre Bausteine, Definitionen und Begriffe, aus den zahlreichen sozialanthropologischen Einzelarbeiten und Uebersichten — sie dürfte in dieser Form ein neuer Versuch sein. — Es schien auf dem zur Verfügung stehenden Raum unmöglich, die Abgrenzungs- und Definitionsversuche der einzelnen Autoren hier anzuführen und gegeneinander abzuwägen, es ist allen entnommen, was etwa auf allgemeine Anerkennung rechnen darf.

Trotz der Jugend der Sozialanthropologie als Sonderforschung gibt es eine große Reihe sehr gedankenreicher und guter Einzelarbeiten, auch vorzügliche Versuche, ganze große Teile des Gesamtstoffes systematisch

darzustellen; nur eine Gesamtdarstellung fehlt noch. Grundlegend für die Herausarbeitung der wichtigsten Begriffe sind die Arbeiten von Ploetz (1895, 1904, 1911), prinzipiell wichtige erste Schritte auf diesen Gebieten bedeuten die Bücher von Ammon (1895, III. Aufl. 1900) und de Lapouge (1896). Reiche Anregung brachte dann ein Preisausschreiben, aus dem die Serie Natur und Staat (Jena Bd. 1 bis 9, 1903 bis 1907) hervorging; das Buch von Schallmayer (I. Preis; 1910, 2. Aufl.) stellt die beste überhaupt existierende Bearbeitung der Sozialanthropologie dar, es sei ganz besonders darauf verwiesen. Weiter sei Woltmanns (1903) „politische Anthropologie" hier genannt, dann Niceforos Werk (1910), welches zuerst die Anthropologie einer einzelnen sozialen Gruppe monographisch vornimmt. — Dann existieren sozusagen monographische Darstellungen von Teilen aus dem Gesamtgebiet, so der „Historischen Anthropologie" von Gobineau, Chamberlain, Woltmann, dann Familienanthropologie, so von Galton, Sommer, Reibmayer, Fahlbeck, Lundborg (s. unten im Text und Literaturverzeichnis).

Zahllose und viele vorzügliche Einzeluntersuchungen findet man in einer Reihe Zeitschriften, von denen auf die eigens sozialanthropologischen hier besonders hingewiesen werden soll (s. Schluß des Literaturverzeichnisses) — ihr Umfang und Gedeihen zeigt das erfreuliche Allgemeininteresse an solchen Fragen.

II. Ergebnisse.

Eine geschlossene Darstellung des gesamten Inhaltes der Sozialanthropologie läßt sich heute im Rahmen der Artikel dieses Handbuches schlechterdings noch nicht geben. Auch nur die wichtigsten Einzelmeinungen einander kritisch gegenüberzustellen, verlangte an Raum und an Eingehen auf Einzelheiten weit mehr als hier möglich ist. So sei im folgenden nur im allgemeinen gezeigt, wie, in welcher Richtung und was gearbeitet wird, so daß man dadurch ein deutlicheres Bild vom Inhalt des ganzen Gebietes der Sozialanthropologie erhält, als durch obige Definitionen — auf Vollständigkeit hat die Skizze keinen Anspruch! — Es soll nach oben erwähnter Reihenfolge der Objekte vorgegangen werden.

1. Sozialanthropologische Untersuchungen an sogenannten „Naturvölkern". Solche liegen als abgeschlossene Werke nicht vor, so lohnend die betreffenden Untersuchungen gerade an diesen Objekten wären. Kein kulturell-primitiver Stamm ist prinzipiell darauf hin untersucht, wie alle seine einzelnen sozialen Einrichtungen auf seine anthropologischen Verhältnisse (erbliche Eigenschaften, biologische Einzelerscheinungen, wie Fortpflanzung, Geburtenüberschuß usw.) einwirken und wie umgekehrt diese auf jene. Nur als Gegensätze zu den betreffenden Verhältnissen bei hohen Kulturvölkern findet man eine Anzahl Einzelheiten hervorgehoben (so bei Schallmayer, Woltmann und vielen anderen). Da ist zunächst zu betonen: die Möglichkeit für den Menschen, sich teilweise den Wirkungen der natürlichen Auslese, die wir beim Tiere wirksam sehen, zu entziehen, besteht. Wir können künstlich Haustierrassen züchten, die, sich selbst überlassen, untergehen müßten, also auch entsprechende menschliche Gruppen. Tatsächlich wird das um so mehr geschehen können, je höher kulturell der Mensch steht (Beherrschung der Methoden). So unterliegen kulturell niedrige für viele Punkte der Auslese, die bei hohen keinen Selektionswert haben. Auf der Kulturstufe des flüchtigen Sammlers und Jägers wird ein wirklich dauernder Kampf um den Lebensunterhalt zunächst negative Auslese bewirken, d. h. austilgen bezüglich angeborener Mißbildungen, höherer Grade von Schwachsichtigkeit, Taubheit, Lahmheit, Verdauungsschwäche, Langsamkeit, Imbezillität usw., dann enges Becken, Stillunfähigkeit und vieles andere. Der Gegensatz bei steigender Kultur erhellt von selbst. Dabei spielt schon sexuelle Auslese mit hinein, da eben je das künftige Familienhaupt der diesbezüglichen Auslese auch in der Konkurrenz gegen die anderen Bewerber um die betreffenden Weiber ausgesetzt ist. Leicht ist zu zeigen, wie Sitten und Bräuche und Gesetze hier modifizierend in den Verlauf der Prozesse eingreifen; schon auf den untersten uns bekannten Stufen haben Häuptlinge oder Familienälteste gewisse Vorrechte, tritt die Ehewahl nach bestimmten Regeln ein usw. Die Zugehörigkeit zu solchem Stamm („sozialer Gruppe") ändert also die biologischen Verhältnisse etwas ab, wenn auch nur ganz wenig. — Neben diesen als Gegensätze zu unseren Kulturzuständen in den allgemeineren Werken mehr oder weniger ausführlich dargestellten Verhältnissen, untersuchen einzelne Autoren zufällig festgestellte Einzelheiten. So zeigt z. B. Kültz (Archiv für Rassen- und Gesellschafts-Biologie II, 1905) wie in Togo in kurzer Zeit die Einführung der christlichen Einehe an Stelle der polygamen Kaufehe die körperliche Ueberlegenheit der Reichen vor den Armen verringert hat, die vorher darauf beruhte, daß der Reiche die schönsten und meisten Frauen kaufen konnte und dadurch gute körperliche Eigenschaften förmlich züchtete. Die Zugehörigkeit zu bestimmten sozialen Gruppen ändert also die anthropologischen

Merkmale. Solcher Beispiele gibt es sehr viele. Eine Menge Sitten: Bewerbungskämpfe, Kampfspiele, Kaufehe, Raubehe, Häuptlingswahl, Kriegsadels-Vorrechte usw. können abändernd wirken.

Umgekehrt, wie die anthropologische Beschaffenheit der betreffenden Menschen auf die sozialen Verhältnisse wirkt (Ausgestaltung, Organisation, Schicksal des Stammes), ist für primitive Kulturen ebenfalls kaum untersucht. Daß die „primitiven" Völkchen „primitiv" blieben, wird sehr vielfach ihrer anthropologischen Eigenheit, d. h. angeborenen geistigen Veranlagung zugeschrieben — gewiß größtenteils mit Recht. Daß die Negerstämme überall die Pygmäenstämme in sogenannte Rückzugsgebiete drängen konnten und diese hier dann auf primitiven Stufen stehen blieben, ist sicherlich zum Teil wenigstens der körperlichen und geistigen Unterlegenheit der Pygmäen gegenüber den Negern zu danken, so daß das Schicksal dieser Völker von ihrem anthropologischen Substrat deutlich abhängt. — Auch der Untergang so vieler Primitivgruppen durch die Kultur, die ihnen der Europäer bringt, ist ein Problem, das, allerdings nur zum Teil, hierher gehört; man kann auf die Maori, Indianer usw. hinweisen (s. z. B. Dempwolff, Zeitschrift für Ethnologie 1904).

Für alle folgenden Kulturstufen, von den niederen an aufwärts, müßten all diese sozialanthropologischen Verhältnisse einzeln untersucht werden — da fehlt ebenfalls noch fast alles. Auch hier sind wieder nur zahlreiche Einzelangaben vorhanden; so ist auf viele Ehegesetze hinzuweisen, die auf allen Kulturstufen in den natürlichen Zuchtprozeß eingreifen, entweder ihn fördernd (Ehebeschränkungen nach Kasten, durch Auslese nach Tüchtigkeit, nach Reichtum da, wo dieser rein persönlich erworben ist, also ohne Erbgang usw.) oder aber ihn hemmend (Erbgang des Reichtums, Eheschluß im Kindesalter usw.); auf viele Maßregeln bezüglich der Kinderaufzucht ist hinzuweisen: Lockerung der Ehen bis zur (stets sekundären) Promiskuität, Kindsmord und Abtreibung — andererseits Aussetzung schwächlicher Kinder (Sparta!), Verlassen von Kranken, Besessenen usw. — All diese Dinge sind noch nirgends genügend durchgearbeitet, aber in ihren Grundzügen einigermaßen klar. Viel genauer erforscht sind diese Verhältnisse in den höchst entwickelten sozialen Gruppen, in den Kulturstaaten.

2. Sozialanthropologische Untersuchungen an „Kulturstaaten" und ihren Teilen. 2a) Einzelne soziale Schichten, Klassen, Kasten usw. Eine sehr gründliche Untersuchung der anthropologischen Verhältnisse der gesamten sozial untersten Schichte europäischer Großstädte legt Niceforo (1910) vor in seiner „Anthropologie der Nichtbesitzenden Klasse", eine sehr willkommene Materialsammlung — dagegen fehlt noch eine gründliche Untersuchung, wieviel von den Sondermerkmalen jener Bevölkerung der Zugehörigkeit zur Schicht oder wie stark umgekehrt diese Zugehörigkeit den Merkmalen zu verdanken ist, ob also die Sondermerkmale Ursache oder Wirkung sind oder wechselnd beides. Die Proletariatsbevölkerung ist gegenüber den sozial oberen Schichten in allen Altersklassen kleiner gewachsen, ist relativ leichter, hat geringeren Brustumfang; sie hat viel häufiger kleine Anomalien (Asymmetrien, Schädelformanomalien usw.), geringere Sensibilität (Tastempfindung) und vieles andere; bezüglich aller Einzelheiten ist auf Niceforo zu verweisen. Es ist sehr schwer, gerade in diesen Punkten Sozialanthropologie und Sozialhygiene abzugrenzen. Die Verbreitung der Rachitis nach sozialen Schichten zu verfolgen, dürfte der Medizin überlassen bleiben, dagegen muß etwa die Untersuchung, wie stark und wodurch die Zugehörigkeit zu „Kultur"-schichten die Knochen gegenüber denen der sogenannten „Wilden" schwerer, plumper, die Fortsätze massiver, derber werden läßt, die Anthropologie mindestens ebenso interessieren (auch Zunahme der Schädelkapazität mit der Kultur gehört hierher — vgl. den Artikel „Gehirn" Bd. IV, S. 685). Daß die Städterin früher menstruiert als das Landmädchen ist bekannt, aber es ist sehr schwer zu sagen, ob da ein anthropologischer Unterschied oder reine Umweltwirkung vorliegt; ob Früh- und Spätheirat, die doch so oft rein sozial bedingt sind, Ernährungsverhältnisse vor und während der Fortpflanzungszeit auch auf die Keime (idiokinetisch, Lenz) wirken können, sind wichtigste, aber ungelöste hierhergehörige sozialanthropologische Fragen.

Innerhalb der sozial untersten Schicht hebt sich wieder eine Gruppe ab, die aus naheliegenden Gründen das gesamte und damit auch das anthropologische Interesse gewann, die der Verbrecher, Vagabunden, Dirnen usw. Ihr Studium ist besonders eifrig betrieben worden, geradezu zu einem besonderem Zweig ausgewachsen, der Kriminalanthropologie. Sie knüpft heute vor allem an den Namen Lombroso (1887) an. Zahlreiche Autoren haben sich spezialistisch damit beschäftigt (H. Ellis, Féré, Ferri, Kurella, Marro und viele andere). Lombroso und seine Schüler haben eine „Naturgeschichte" des Verbrechers zu entwerfen versucht. Man wollte im Verbrecher einen besonderen anthropologischen Typus er-

kennen, eine Art Rückschlag auf eine frühere Form, auf unsere Vorfahren im Urzustand. Man verglich ihn mit heutigen primitiven Rassetypen. Es hat sich als falsch erwiesen, aber das Verdienst bleibt der Lombrososchen Richtung, daß man immerhin die typische Besonderheit mancher Verbrecher erkannte. Der sogenannte Gewohnheitsverbrecher („instinktive" Verbrecher, „moralisch Irre") stellt tatsächlich eine besondere Variante geistiger Anlagen dar; die angeborenen Anlagen auf dem Gebiete des Gefühlslebens, weniger auf dem des Phantasie- und Intellektslebens, der Ablauf der Willensimpulse, der Hemmungen usw. sind — bald hier, bald da — wechselnd stark und in mannigfacher Kombination anders als beim Normalen. Solche Verbrecher sind tatsächlich durch angeborene über die Grenze des Normalen hinausgehende Merkmale ihres Zentralnervensystems (bezw. dessen Funktionen) ausgezeichnet. Daß ein solcher Mensch Verbrecher wird, dazu bedarf es dann veranlassender Momente, die aber in allen ausgeprägteren Fällen unser Kulturmilieu immer gibt — solche Varianten passen schlechterdings nicht in unsere sozialen Verhältnisse. — Bei vielen ist — aber es ist in Wirklichkeit kein Unterschied — die Anomalie in der geistigen Veranlagung so stark oder so einseitig, daß man sie ohne weiteres kurzweg als Irre bezeichnen kann. Daß da alle Uebergänge bestehen, daß das ganze Bild von der nervösen Entartung, Degeneration uns verständlich wurde, daß kleinste psychopathische Züge oder Neigungen außerordentlich oft vorkommen und ihre Steigerung und Kombination ohne jede scharfe Grenze in jene Gebiete führt — das haben uns die grundlegenden Arbeiten von Moebius, Morel, Kraepelin, von Krafft-Ebing, Sommer und viele andere gelehrt; Bumke (1912) gibt ein ausgezeichnetes Referat über die ganze Frage der „nervösen Entartung" (s. Literatur).

Eine ungeheuere Literatur (besonders italienische) hat die Frage hervorgerufen, ob der Verbrecher sich auch durch körperliche Merkmale auszeichnet (also abgesehen vom Gehirn). Das ist die Lehre von den anthropologischen Verbrechermerkmalen, welche außer eigentlichen Verbrechern auch Vagabunden, Trinkern, Dirnen zukämen, die aber auch identisch wären mit allgemeinen „Degenerationszeichen" und dann neben jenen bei Geisteskranken, Imbezillen usw. gesucht wurden. Als solche Merkmale werden angegeben: Asymmetrien des Schädels, Nahtanomalien, Massigkeit und Größe des Unterkiefers, fliehende Stirn, Zahnanomalien, abstehende Ohren, Darwinsches Spitzohr, angewachsene Ohrläppchen, spärlicher Bart und üppiges Haupthaar, physiologische Eigenheiten wie starrer oder stechender Blick, dicke Lippen usw. Anomalien an inneren Organen, physiologische Merkmale wie herabgesetzte Schmerz-, Druck- und Tastempfindung usw. (damit wird die Neigung zum Tatauieren erklärt). — Alle Merkmale ohne Ausnahme kommen auch bei Normalen vor, doch scheint wirklich die Häufigkeit der einzelnen und die Häufigkeit der Kombination besonders zahlreicher Merkmale beim Verbrecher viel größer zu sein als beim Normalen. Wir wissen über wahre Korrelation dieser Dinge (die von den sich „mendelnd" vererbenden „Erbeinheiten" abhängen muß) noch nichts, immerhin besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit, daß Individuen die in ihren geistigen (d. h. gewissen Hirn-)Anlagen an und über die Grenze des Normalen variieren, auch bezüglich anderer Organe dies tun — und die meisten jener „Merkmale" sind als Hemmungsmißbildungen aufzufassen.

Die oben erwähnte, nach den neuen Methoden noch wenig untersuchte Vererbungsfrage hat ebenfalls eine Unzahl Arbeiten veranlaßt. Man hat die „Verbrecherfamilie" untersucht, von mehreren sind große Stammbäume veröffentlicht, so von der Familie Jukes in Amerika, die in 5 Generationen etwa 100 Individuen zählte, 10% waren schwere Verbrecher, 52% der Frauen Prostituierte (nach H. Ellis 1895), andere Bettler, Vagabunden, Armenhäusler usw. Jörger beschreibt (Archiv für Rassen- und Gesellschafts-Biologie II, 1905) eine Familie „Zero", die aus ca. 300 Personen bestand — auch hier nur eine Kette von Verbrechen, Landstreicherei, Bettel, Verarmung, Prostitution, Geistesstörungen. Es kann kein Zweifel sein, daß man es mit deutlicher — meistens eingezüchteter — Familienanlage zu tun hat — man hat auch berechnet, wieviele Millionen solche Familien an Gerichts- und Verpflegungskosten der Gesamtheit verursachen.

Anhang: Praktische Gründe veranlaßten es, daß man für die anthropologische Untersuchung des Verbrechers besondere Methoden ausgearbeitet hat. Es galt, durch Messung, Aufzeichnung deskriptiver Merkmale und Photographie, je bestimmte Personen so zu charakterisieren, daß man sie nach diesem „Signalement" sicher wiedererkennt. Die Messungen sind die üblichen anthropologischen, für sie und die rein deskriptiven Angaben hat Bertillon ein Schema angegeben; man nennt seine Methode gelegentlich einfach „Bertillonage" (Bertillon 1893). Chervin hat versucht, auch das Photographieren in feste Regeln zu legen, der Versuch dürfte als wenig glücklich bezeichnet werden. Am meisten verwandt wird

die „Dactyloskopie“, die Aufzeichnung der Fingerabdrücke (vgl. den Artikel „Haut“ Bd. V).

Die sozialen Schichten über der alleruntersten sind sozialanthropologisch viel weniger bearbeitet wie jene. Monographien fehlen da ganz. Dagegen gibt es Einzelangaben, vor allem in Form von Vergleichsdaten bei der Untersuchung sozial oberster Schichten. Ueber die sozialen Schichten des Arbeiters, Bürgers, Bauers werden zu jenem Zweck besonders Angaben über die Fortpflanzungsverhältnisse gemacht (Fruchtbarkeit, Sterblichkeit usw.), die Zugehörigkeit zu den betreffenden Schichten als solche hat bedeutenden Einfluß auf jene biologischen Verhältnisse, wie unten noch erwähnt wird. Ammon (1900) zeigt dann, wie unsere Kulturerscheinung der sogenannten Landflucht, die Anziehungskraft der Städte und Großstädte bäuerliche Gruppen anthropologisch verändern kann. Wenn bestimmte Rassenelemente in der rassig gemischten Landbevölkerung etwa mehr Neigung zum Auswandern haben, oder der Anziehung der Stadt eher erliegen als andere, wird ein Rasseelement stärker, eventuell allmählich ganz dem Land entzogen. Da dann weiter das Großstadtleben eine geringere Vermehrung der betreffenden Familien oder gar deren Verminderung und Aussterben verursacht, werden jene Linien ganz verschwinden. Ammon sieht diesen Vorgang als erwiesen an. Ob wirklich die geringen anthropologischen Unterschiede zwischen Landflüchtigen (bezw. deren Kindern) und den anderen so zu deuten sind und ob der für Baden versuchte Nachweis, falls er hier gilt, verallgemeinert werden darf, ist sehr fraglich (s. Ploetz 1895).

Ueber Bauernfamilien Schwedens hat Lundborg (1913) ein fundamentales Werk veröffentlicht, das vor allem geistige Veranlagungen verfolgt (das Werk war dem Referenten noch nicht zugänglich). Für viele hierher gehörige Angaben sei auf Ploetz, Schallmayer, Ammon verwiesen, sowie auf viele Einzelarbeiten im „Archiv“ und der „Revue“.

Reibmayr bringt in seiner Untersuchung über die „Entwickelungsgeschichte des Talentes und Genies“ (1908) eine Menge Angaben, die sich auf jene sozialen Schichten beziehen. Er zeigt wie diese Schichtung, deren Wert für die Vermeidung planloser und schädlicher Panmixie schon Ammon (1900) stark betonte, förmlich als Inzuchtskreise wirken, wie äußere Verhältnisse, z. B. der Beruf des Bauers, des Kaufmanns, Seefahrers, Kriegers, sich mit jenen Inzuchtswirkungen kombinieren, um einseitige aber allmählich gefestigte Erbmassen und darin dann Talentzüchtung hervorzubringen. Die relative Abgeschlossenheit dieser Schichten (Adel, „ehrbare Geschlechter“, Zünfte, Bauernschaft usw.) hat im Mittelalter zu ihrer Hochzucht, charakteristischen Eigenart und Fähigkeit, bedeutende Männer, Talente (Künstler), Genies hervorzubringen, außerordentlich viel beigetragen (Einzelheiten sind bei Reibmayr nachzusehen). — Eine Grenze zwischen anthropologischer Untersuchung ganzer solcher sozialer Gruppen und einzelner Familien gibt es nicht — in kleineren solchen Gruppen können fast alle Mitglieder blutsverwandt sein, also Familienverbände darstellen. So gehören alle diese Untersuchungen zugleich zur Familienanthropologie, so daß hier ein kurzer Blick auf diese angebracht ist. „Familienanthropologie“ untersucht die erblichen Merkmale je gesonderter Familien, also von Individuen, die Blut vom selben Ahn her in sich tragen. Die Familienanthropologie erfreut sich erst seit sehr kurzer Zeit einiger Pflege und doch wird gerade sie der Gesamtanthropologie wichtigste Ergebnisse liefern können. Da man nur für drei bis vier sich folgende Generationen über eigene Beobachtung verfügt, müssen zur Feststellung früherer Merkmale historische Methoden verwandt werden. Dazu gibt Sommer (1907) eine sehr gute Anleitung; O. Lorenz (1898) und Heydenreich (1909) werden dem Anthropologen bezüglich der Stammbaumforschung unentbehrlich sein, Crzellitzer (Zeitschrift für Ethnologie 1909) stellt neben „Stammbaum“ und „Ahnentafel“ (s. Sommer) die „Sippschaftstafel“. Heute wird keine brauchbare Erblichkeitsuntersuchung gemacht werden können ohne gründliche Kenntnis der sogenannten Mendelschen Vererbungsregeln (Haecker, Allgemeine Vererbungslehre, Braunschweig 1912; Bauer, Einführung in die experimentelle Vererbungslehre, Berlin 1911).

Die modernen Untersuchungen und Experimente über die Vererbung in tierischen und pflanzlichen Generationsreihen („Familien“, „Linien“) haben auch für den Menschen den Beweis erbracht, daß der Familienanthropologie die Untersuchungen rein statistischer Art, wie sie Galton (1910) und ganz besonders Pearson und seine Schule (s. Biometrica Bd. I bis IX) unternahmen, lediglich Materialsammlungen, allerdings sehr wertvolle, sind; die rein mathematisch-statistische Behandlung hat uns anthropologisch (biologisch) nicht gefördert.

Wie Familienanthropologie vorgehen kann, zeigen einige Beispiele von sehr gut und über lange Zeit durchgearbeiteten Familien. Reibmayr bringt da einige Fälle, Haecker (l. c.) z. B. über die sogenannte Habsburger Lippe, Lomer (Halle 1907) hat versucht Bismarcks Erbanlagen aus den Aszendenten zu erklären,

vor allem hat aber Sommer (1908) sehr schöne Resultate vorgelegt über Goethes Familie. Er zeigt wie einzelne Züge im Geistesleben Goethes in der Familie seiner Mutter sich vorfinden, wie dort Erbmasse künstlerischer Begabung von Lucas Cranach, Soltau und anderen her, mit Intelligenzanlagen, die viele Gelehrte hereinbrachten, sich kreuzten, um nun in der einen Dichterpersönlichkeit in höchster Vollendung kombiniert zu erscheinen, die von Vaterseite her das „ernste Führen", die Erbmasse ehrenfester, aber kleiner Bürger aufgenommen hat. —

Die familienanthropologische Untersuchung solcher allen Durchschnitt hoch überragender Persönlichkeiten, die wir Genie nennen dürfen, erfreute sich besonderer Beliebtheit. Die meisten Arbeiten behandeln zwar die medizinische Seite der Erscheinung solcher außergewöhnlicher Geistesanlage, die Frage, ob sie als pathologisch, oder mit solcher verwandt anzusehen sei (Lombroso [l. c.], Moebius [1898] und Lenz [1913]). — Galton (1910) untersuchte die Häufigkeit des Genies, die Zahl und Häufigkeit seiner begabten Anverwandten, Reibmayr zeigt, wie ein Aussterben der Familie, mindestens im Mannesstamme die Folge ist, wie die großen Talente und Genies sich geographisch infolge von Rassenmischung, „Inzuchtkreisen" (s. o.), in jedem Volke ganz bestimmt verteilen, Woltmann (1905) weist ihren Zusammenhang mit der Rasse, in Europa speziell mit der „nordischen" Rasse nach (s. u.).

Endlich steht der Familienanthropologie die Frage nach der Wirkung mangelnder Familienkreuzung, d. h. der „Inzucht", zur Beantwortung. Wie reiche Erfahrungen am Tier und einzelne am Menschen lehren, ist eine mäßige und nicht zu ausschließliche Inzucht gesunder Stämme nur förderlich; ja zur Hervorbringung einer fest in einer Bevölkerung sitzenden, allgemeiner verbreiteten Eigenschaft sind, wie Reibmayr sehr schön zeigt, Inzuchtskreise unbedingt nötig; so führte die Inzucht in unseren Dörfern, dann im Adel z. B. in England (s. Galton) im allgemeinen nur zu Gutem. Man hat einzelne Beispiele, wo auch engere Inzucht, also die Fälle, die als enge „Verwandtenehe" bezeichnet werden, mehrere Generationen lang ohne üble Folge vorhanden war. Fischer (Rehobother Bastards. Jena 1913) hat dasselbe bei einer primitiveren Gruppe gezeigt, ebenso Pöch (Archiv für Rassen- und Gesellschafts-Biologie 1908). Feer (Berlin 1907) stellt die neueren Ansichten über Verwandtenehen zusammen, sie sind durch unsere seitdem gewonnenen Kenntnisse der Mendelschen Erbregeln nur besser begründet, kaum geändert worden. Danach kann man von „Verwandtenehen" sagen, daß solche zwischen wirklich und der Anlage nach gesunden Partnern durchaus unbedenklich sind; aber man wird selten in der Lage sein, latente Erbanlagen („Heterozygoten" mit rezessiven Erbeinheiten) mit absoluter Sicherheit auszuschließen und die Chance, daß dann eine solche von beiden Eltern zusammen kommt, ist natürlich größer als sonst — das erklärt dann die öfters beobachteten schlimmen Folgen einer Verwandtenehe. Eine ausgezeichnete Illustration dazu stellt die interessante Studie Ujfalwys (Archiv für Anthropologie 1904) dar, der an den Ptolemäern zeigt, wie eine Familie, die einmal eine böse Erbschaft gemacht hat, diese dann durch Inzucht und „Incestzucht" (Geschwisterehe) steigert und daran zugrunde geht (Gattenmord, Kindermord, Geisteskrankheiten).

Die sozial obersten Schichten — Adlige, Fürstengeschlechter sind bezüglich mancher Punkte deshalb ein besonders geeigneter Studiengegenstand, weil sie über viel genealogisches (biographisches und ikonographisches) Material verfügen. Fahlbeck (1903) hat eine sehr schöne Untersuchung über den schwedischen Adel vorgenommen, er hat die Alters-, Fortpflanzungs-, Aussterbeverhältnisse in vorbildlicher Weise dargelegt. Für andere Länder und andere obere soziale Schichten fehlen solche Monographien noch völlig, gerade wie eine „Anthropologie der Besitzenden" als Gegensatz zu Niceforos oben erwähnter Anthropologie der Nichtbesitzenden ebenso erwünscht wie erfolgversprechend wäre. Die Punkte, die für den Adel Fahlbeck am eingehendsten untersucht und die für die höheren bürgerlichen Schichten — die feudalen Bürgersippen aller Zeiten — sich als ganz gleich erweisen, die Fortpflanzungsverhältnisse, haben in neuester Zeit das größte Interesse aus dem Gesamtgebiet der Sozialanthropologie erregt — die eminent praktische Seite dieser Frage tritt erschreckend klar vor die Augen der heutigen Generation: In allen früheren und heutigen Kulturstaaten Europas, in allen heutigen Tochterstaaten Europas sind ausnahmslos die sozial oberen und obersten Schichten bedeutend weniger fruchtbar als die unteren, sie scheinen zum Aussterben zu neigen, welche Erscheinung dann weitere Schichten zu erfassen scheint, so daß die Gesamtbevölkerung zurückgeht.

Die Arbeiten über das Gebiet sind zahllos. Auf die rein bevölkerungsstatistischen, von der berühmten Malthusschen Untersuchung an bis zu den modernen Bearbeitungen von Volkszählungsresultaten kann hier nicht eingegangen werden; die Begriffe Natalität („korrigierte"), Geburtenüber-

schuß usw. sind in volkswirtschaftlichen Werken (z. B. Mayr, Statistik und Gesellschaftslehre, Bd. II. Freiburg 1897) nachzusehen. Sozialanthropologische wie statistische Untersuchungen bemühen sich vor allem Umfang und Gründe jener Erscheinung aufzudecken. Schallmayer (1910) gibt darüber die bei weitem gründlichste Bearbeitung, vielleicht sein weittragendster Gedanke war der, neben unsere abendländischen Kulturen ein ostasiatisches Kulturvolk zu stellen, an der chinesischen Kultur zu zeigen, daß nicht jedes Kulturvolk jene Absterbeerscheinungen unbedingt haben muß; neben Schallmayer sei auf Ammon, de Lapouge, Ploetz, Wolf u. a. verwiesen. Aus allen darauf bezüglichen Arbeiten geht nun zunächst hervor, daß die Fruchtbarkeit, die Zahl der Kinder pro Ehe in den sozial oberen Schichten beträchtlich geringer ist, wie in den unteren; im einzelnen haben das untersucht Mombert (1907), in einer eingehenden Studie über die Bevölkerungsbewegung Steinmetz (1904), der eine schöne Statistik über die Nachkommenziffern der sozial führenden Stände Hollands vorlegt und viele andere (fast jeder Band des Archivs für Rassen- und Gesellschafts-Biologie enthält Beiträge, siehe z. B. Pearsen Bd. 5). Man kann für jene als sicher feststehend zu bezeichnende Erscheinung folgende Gründe anführen: 1. Häufigere Ehelosigkeit der oberen Schichten; Männer und Frauen bleiben teils des Berufs wegen (katholischer Clerus, Lehrerinnen, Pflegerinnen), teils aus Verantwortlichkeitsgefühl und besonders aus Bequemlichkeit ehelos. 2. Geringere Fruchtbarkeit der Verheirateten, bedingt durch folgende Punkte: a) Höheres Heiratsalter. Die sozial oberen Schichten, besonders Männer, heiraten viel später als die unteren; die durchschnittliche Kinderzahl steht zum Alter in deutlicher (negativer) Korrelation (s. Schallmayer); b) Größere Beteiligung der sozial Oberen an Geschlechtskrankheiten (z. B. bei Arbeitern in etwa 9%, bei Studenten in etwa 25% — in großen Städten) — Punkt b hängt mit a eng zusammen. Daß sehr oft Unfruchtbarkeit (Tripper) oder Produktion von Totgeburten und abnorm Lebensschwachen (Syphilis) die Folge ist, ist leicht zu erweisen (Schallmayer, Gruber u. a.); c) Minder- und Unfruchtbarkeit unter direkten (?) Milieueinflüssen: geistige Arbeit scheint den geschlechtlichen Impetus, vielleicht auch die Fruchtbarkeit zu hemmen, besonders reiche Ernährung das letztere, die geistigen Anstrengungen (Beruf und sogenannte Vergnügen) schwächen die Gesamtnatur der oberen Schicht mehr als die entsprechenden in der unteren. d) Der weitaus wichtigste Punkt ist die gewollte Beschränkung der Kinderzahl. Diese Erscheinung hängt wohl fest mit unserem Erbgang zusammen, das Hauptmotiv ist das Bestreben, eine Zersplitterung des Besitzes zu verhüten. So führt Reichtum, wie es scheint, unweigerlich zum Zwei- (oder Drei-) und zum Ein-Kindersystem. In den sozial oberen Schichten sind die Ansprüche ans Leben, an gute Erziehung derart, daß jedes Kind mehr als Sorge, als Hemmung im sozialen Vorwärtskommen, auch als Behinderung in der Verschaffung von Lebensgenüssen wirkt. So wird durch künstliche Mittel die Kinderzahl beschränkt. Diese Gepflogenheit geht in den Kulturstaaten sehr rasch auf weite, auch untere Kreise über. Das bekannteste Beispiel ist Frankreich. Aber alle anderen Kulturstaaten gehen — in den Großstädten im Sturmschritt, auf dem Lande langsam, aber sicher — demselben Ziel entgegen. Frankreich ist nicht anders wie die übrigen, nur um 1 oder 2 Generationen voraus.[1]) Da die moderne Medizin in den letzten Jahren die Todesziffern pro Jahr durch ihre hygienischen Maßnahmen (vor allem die Säuglingssterblichkeit) stark herabgedrückt hat, wird für flüchtige Beobachter jene Erscheinung verschleiert; die europäischen Völker (außer Frankreich) vermehren sich noch; aber nur dadurch, daß die jährlichen Todesfälle viel stärker abnehmen, wie die jährlichen Geburtsfälle. Und das muß natürlich (relativ bald) ein Ende haben, die Hygiene wird nur noch ein Stück weit die Todesfälle vermindern können, dann wird sich die fallende Geburtsziffer geltend machen. Frankreich ist jetzt schon lange so weit (zum Teil wird die Erscheinung durch Einwanderung etwas verdeckt). Der Ueberschuß der Geburten über die Todesfälle sank in Frankreich von 4,1‰ von 1841 bis 1850 herunter auf 2,2‰ von 1881 bis 1885, auf 1,9‰ von 1901 bis 1904 — stieg dagegen in Deutschland von 9,5 auf 11,2 und 14,8 in denselben Zeiten (Mombert). Aber die Geburtsziffern gehen herunter: Die Geburtenhäufigkeit ist seit 1890 in Frankreich insgesamt um 3,2% gesunken (von 22,6 auf 19,4%) in Deutschland aber um 7,2% (von 37 auf 29,8%) also um mehr als das Doppelte! Unsere Großstädte zeigen ein rapides Sinken der Geburtenziffern, es wird die heutige größere Aufklärung und gesteigerte Warenanpreisung das Tempo der Verbreitung des Zweikindersystems gegen früher (Frankreich) bedeutend steigern. — Es ist unmöglich, auf Einzelheiten näher einzugehen, es sei wiederholt auf die betreffende meist allgemeinverständliche Literatur hingewiesen, siehe Borntraeger, Marcuse, Wolf, vor allem: Theilhaber (1913).

[1]) Anm. b. d. Korr. Theilhaber (1913) zeigt, daß Berlin alle anderen Großstädte außer Paris darin schon überholt hat.

Daß es die genannten Faktoren in unserer Kultur sind, die das bewirken und daß nicht Kultur als solche etwa ein „Altern“ oder eine unentrinnbare Degeneration hervorruft, das hat Schallmayer sehr schön am Gegenbeispiel der chinesischen Kultur zeigen können. Dort ist aus religiösen Gründen Kindersegen allgemein erwünscht, kein Erbgang tritt hemmend ein, dort haben die sozial oberen Schichten eher mehr Kinder als die unteren, von einem Aussterben ist keine Rede.

Ganz außerordentlich wichtig ist nun der Hinweis auf die Tatsache, daß die Erscheinung des Aussterbens sozial oberer Schichten eine qualitative Seite hat, und sie ist viel bedeutungsvoller als die quantitative. Wenn in einem Volke alle Schichten anthropologisch einer einzigen Rasse angehören, wird jenes Aussterben bestimmte (körperliche und) geistige Varianten innerhalb des Volkes mehr oder alleinig treffen gegenüber anderen und sie in ihren Nachkommen ausmerzen. Ganz ohne Zweifel repräsentieren die sozial oberen und obersten Schichten diejenigen genealogischen Linien, die im Durchschnitt mehr Tatkraft, Umsicht, Intelligenz, Phantasie haben, geistig im ganzen viel höher stehen und zwar nicht nur an erworbener Bildung sondern an angeborener Anlage, als die unteren; für den Durchschnitt ist das ganz sicher; diese aber werden dauernd ausgemerzt. Daß sich damit die gesamten Erbqualitäten eines Volkes ändern müssen, ist klar. Der Vorgang wird aber noch dadurch kompliziert, daß fast nie ein Volk aus einer einzigen Rasse besteht. Und dann erhebt sich folgendes Problem: Wenn kurz gesagt die angeborene Begabung und Befähigung zum Einrücken in die sozialen obersten Schichten vor allem bei einem der gemischten Rasseelemente ist, und (oder) wenn durch den historischen Bildungsprozeß des Volkes ein Rasseelement sich (etwa als Erobererschicht) in die sozial oberen Schichten einschob und sie (ausschließlich oder) vorzüglich bildet, dann wird durch jenen Aussterbeprozeß der Geschlechter die rassenmäßige Zusammensetzung der Schichten, ja des ganzen Volkes qualitativ, eventuell ganz gründlich im Laufe einiger Jahrhunderte geändert. Man hat beim Erforschen dieses Prozesses fast nur die Verhältnisse bei uns berücksichtigt und man hat von anderer Seite dieser Forschung vorgeworfen, daß sie nur die Germanen als geborene „Herrenschicht“ gelten lassen wolle und einseitig für die Verherrlichung der Germanen eintrete. Das ist bei vielen Autoren zuzugeben. Aber das Problem als solches wird durch solche Einwürfe weder gelöst noch werden jene Ausführungen widerlegt. Als Problem bleibt es bestehen und harrt noch gründlicher Bearbeitung; es läßt sich z. B. ebenso in Afrika verfolgen, wo im großen Fulhaaufstand sich die Fulha (Fulbe) als Herrenschicht über die vernegerten Haussa aufschwangen; „Vernegerung“ von arabischen „Herrenschichten“ geht ebenso auf dem Wege jener sozialanthropologischen Vorgänge vor sich, wie die „Entgermanisierung“ ehemaliger germanischer Staatengründungen. Weiter hat Theilhaber (1911) eine schöne Studie vorgelegt, wie sozialanthropologische Einflüsse auf das Leben der Judenschaft innerhalb der christlichen Völker (speziell Deutschlands) wirken; alle obigen Faktoren der Ausmerzung machen sich hier besonders stark geltend. Die starke angeborene — rassenmäßige Differenz zwischen Juden und der germanisch-alpinen bezw. mediterranen Hauptbevölkerung Europas wird bezüglich des von Theilhaber dargestellten Aussterbeprozesses vieler Judenfamilien von großem Einfluß sein — aber von viel, viel größerem bezüglich der Fähigkeit der Juden im heutigen wirtschaftlichen Milieu mit jener zu konkurrieren, sie bezüglich des Eintrittes und Beharrens in sozial oberen Schichten zu verdrängen und zu ersetzen — für dieses Milieu scheint die nordische Rasse geistig am wenigsten geeignet. Man sieht, hier fließt dann auch die Anthropologie der sozialen „Schicht“ (Klasse — Stand) also „Sozial“-Anthropologie im engsten Sinne, zusammen mit der der Staaten — historische Anthropologie — indem eben eine qualitative Aenderung ganzer Schichten, ein Schwund ganzer Bevölkerungselemente, ein beginnendes Aussterben immer weiterer Schichten von größtem Einfluß auf die Leistungsfähigkeit des betreffenden Gesamtvolkes, ja schicksalsbestimmend für seine Rolle als Nation sein muß; Schallmayer, Woltmann und viele andere führen das im einzelnen aus.

Denkt man diese Probleme aus, so sieht man leicht ein, wie eine der folgenschwersten Erscheinungen im äußeren Leben eines Volkes davon aufs engste berührt wird, der Krieg. In der Tat sind es heute in allen europäischen Staaten die an der Wehrkraft interessierten Regierungskreise, die das meiste Interesse haben für die Frage des Geburtenrückganges; daß in den neusten Wehrvorlagen Deutschlands und Frankreichs, in Englands Flottenfragen auf diese Weise anthropologische Faktoren von Bedeutung (und künftig sogar von ausschlaggebender sind) sei hier nur angedeutet.

Auf die ganz gewaltigen Unterschiede von Stadt und Land sei hier besonders hingewiesen. Theilhaber legt soeben eine Monographie vor über die Sterilität Berlins,

die geradezu erschreckende Resultate feststellt!

Neben den Fortpflanzungsverhältnissen sind alle anderen Einflüsse der Zugehörigkeit zu sozial mittleren und oberen Schichten eines Kulturstaates im allgemeinen viel weniger bearbeitet worden; nur einzelne ragen da heraus. So hängt die Frage nach dem Alkoholkonsum des einzelnen Individuums zum Teil auch von seiner sozialen Stellung ab. — Da Alkoholmißbrauch sicher, Alkoholgenuß nach der Meinung vieler, die Keime schädigt, gehört das Gebiet unstreitig auch zum Teil mit zur Sozialanthropologie (und erst recht zur Rassenhygiene) — die Literatur über dieses Thema ist riesig; Verzeichnis einiger wichtigen Arbeiten bei Gruber und Rüdin (1911).

Die anderen Fragen (z. B. „verkehrte" Auslesewirkung des modernen Krieges, Störung fast aller sexuellen Auslese, Wirkung der Seuchen, der künstlichen Säuglingsernährung usw.) müssen hier übergangen werden (s. Schallmayer, Ploetz u. a.).

Endlich ist noch auf eine andere Art sozialer Schichtenbildung und ihre sozialanthropologische Bedeutung hier kurz hinzuweisen, nämlich die, bei der soziale Einrichtungen für einen möglichst dichten Abschluß gegen Aufnahme fremden Blutes sorgen. Man spricht dann von Kasten, so z. B. im alten Inkareich, Aegypten, vor allem aber in Indien. Eine ganz scharfe Grenze existiert gegen manche „Stände" (einst und jetzt) nicht; „Kastenwesen", kastenartige Einrichtungen gab und gibt es vielerorts: „ebenbürtige" Fürsten; Leviten u. a. Anthropologisch wirken Kasten als Inzuchtskreise; sie stellen den stärksten — aber trotzdem lange nicht völlig undurchlässigen — Wall gegen Rassenmischung dar und kommen wohl nur vor, wo die zusammenlebenden Rassen stark different sind. Im einzelnen sind die sozialanthropologischen Probleme an den Kasten, z. B. Indiens, kaum studiert; daß die alten indischen Gesetzbücher eine Menge rassenhygienischer Vorschriften enthalten, daß also da viele und starke Einflüsse von der Zugehörigkeit zu einer Schicht je auf das betreffende Individuum ausgingen, wurde mehrfach ausgeführt (z. B. Politisch-Anthropologische Revue III, S. 264).

2b) Völker und Staaten. Wenn in all den oben dargelegten sozialanthropologischen Verhältnissen der sozial oberen Schichten ganz deutlich gezeigt werden konnte, daß die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Schicht die Biologie der betreffenden „Linien" (Geschlechterfolgen) gewaltig beeinflußt, so kann auch eine Menge Material beigebracht werden für das Umgekehrte, für die Abhängigkeit des Charakters und der Leistungen der einzelnen Schichten vom anthropologischen Substrat, d. h. von den Rassenmerkmalen der betreffenden Individuen, die die Schicht bilden. Aber in der Wirklichkeit sieht man die Leistungen einer Schicht nicht isoliert von der der anderen, ja meist sind das untrennbare Wechselwirkungen — die Schichten sind ja biologisch auch nicht scharf getrennt, sondern kreuzen ihr Blut — so muß man zur Untersuchung dieser Frage je ein Ganzes, also das Volk untersuchen und nicht einzelne Schichten! Damit betritt man dann also völlig das Gebiet der eigentlichen „historischen Anthropologie".

Hier kann die Frage, ob die Zugehörigkeit zu einem Volke oder Staat die Biologie des Einzelnen beeinflußt, fast ganz in den Hintergrund treten, die Verbindung von Staat und Individuum ist zu locker, zu sehr mittelbar (wobei die soziale Gruppierung usw. diese Mittelfaktoren darstellen) — wir kennen wenig solche Wirkungen (z. B. Auslesewirkungen des modernen Krieges). Aber um so mehr ist das umgekehrte Verhältnis bearbeitet, wie es gerade oben angeführt ist. Sollen Wirkungen der anthropologischen Gesamtveranlagung der Menschen, die ein Volk oder einen Staat bilden, auf dessen Schicksal einen starken und lokal oder zeitlich stark differenten Einfluß haben, so müssen — ceteris paribus — jene anthropologischen Merkmale stark different sein. So nehmen alle betreffenden Autoren starke Rassenunterschiede an (umgekehrt wird sehr oft erst aus den ungleichen Resultaten auf eine Ungleichheit der Rassenanlagen geschlossen — man bewegt sich da leicht in falschem Kreisschluß). Kaum ein Gebiet produziert dabei soviel Tendenzschriften, da soll die alleinige Kulturfähigkeit der Germanen, dort die der Juden, dort deren völliges Gegenteil erwiesen werden, hier die stärksten Rassenunterschiede, dort das Fehlen jeglichen Unterschiedes!

Gobineau hat zuerst ausführlich und bewußt (von den paar Vorläufern kann abgesehen werden) jenes Problem aufgerollt und zu lösen versucht — 1853.

Gerade heutzutage, wo Schemann (1907) uns eine tadellose Uebersetzung des lange verkannten oder unbeachteten Werkes geschenkt, seine und des Autors Bedeutung und Schicksale in einer feinen und kritischen Untersuchung (1910) dargelegt hat, gewinnt das Gobineausche Werk sehr an Ansehen. Man darf ruhig seine historischen Fehler, seine anthropologischen Unrichtigkeiten zugeben — es bleibt ein von ihm geschaffenes Neues wohl als Bestand dauernd, eben die Idee des oben genannten Problems, die Fragestellung als solche und ihre prinzipielle Bejahung. Nach ihm haben Viele ähnliches

versucht, vor allen sei hier Woltmann genannt, der an Einzelgeschichten von Völkern den Einfluß der Rassenveranlagung glänzend dargetan hat. Auch hier lassen sich — es ist ja fast Neuland — in Einzelheiten Fehler auf historischem, linguistischem, auch anthropologischem Gebiet, Kritiklosigkeit an manchen Punkten, Hypothesenbau zugunsten der Theorie nachweisen — und doch ist auch hier der Kern richtig und das Ganze groß. Und noch einen Schritt weiter trifft man Chamberlain (1903) den großen Darsteller, den praktischen und kühnen architektonischen Former jener von Forschern entworfenen Pläne und Grundrisse. Unbekümmert um schwanken Grund vieler Einzelheiten, unerlaubt selbst gut gefestigte Begriffe sich zweckdienlich willkürlich abändernd, entwirft er ein kühnes Gesamtbild des Gedankens, das dann natürlich tausend äußere Angriffspunkte bietet, so daß der wahre Kern dem Angriff entgeht — und er würde ihm standhalten. — All die anderen brauchen hier nicht namentlich aufgeführt zu werden; s. die Literatur bei jenen und alle Bände der politisch-anthropologischen Revue.

Und der Kern, der nun aus all dem als dauernd sich erweisen wird?

Man sieht ein Volk mit bestimmter Kultur leben; man kann historisch zeigen, daß eine Einwanderung fremden Volkstums mit fremder Rasse stattfindet; das neue Mischvolk erlebt eine ungeahnte herrliche Kulturblüte; man kann zeigen, daß all die oben geschilderten kulturellen Einflüsse die eine Rasse wieder eliminieren, ausmerzen, Generation um Generation — und man findet historisch einen kulturellen Verfall, einen inneren und äußeren Niedergang und Untergang: sollen da keine kausalen Zusammenhänge bestehen? — Indogermanische Völker, die mindestens ein starkes Kontingent nordischer Rasse in sich bargen, schieben sich auf die vorhellenische Bevölkerung — einige Zeit darauf erstrahlt der Glanz Griechenlands — der Untergang der Vollbürgergeschlechter, die Aufnahme der Unfreien-Abkömmlinge und der Nachkommen der ins Hinterland verdrängten alten Bevölkerung ist uns historisch verbürgt — einige Zeit darauf Niedergang! Das Rassenmischungs- und Degenerationsprodukt des niedergegangenen Rom in Italien wird von Germanen überschichtet — einige Zeit danach die Renaissance. — Die Erben der Oströmischen Metropole, die dauernd griechische Vorbilder und Tradition gehabt hätten, erleben keine Renaissance — es war auch in Italien keine Wieder- sondern eine Neugeburt, der neuen Rasse zu verdanken — neben dem Milieu. Woltmann und die anderen verkennen die Milieuwirkung nicht; äußere Gunst, Anregung usw. muß unbedingt dazu kommen. Die beste Rasse auf den Nordpol versetzt, wird keinen Stahltrust gründen — heißt es einmal — aber Indianer saßen über Kupferlagerstätten und haben keine bescheidenste Metalltechnik erfunden! —

So versucht man beim Aufstieg Roms den Rassefaktor mit in Rechnung zu setzen; man weist darauf hin, daß wenn Rom an der Stelle Neapels gelegen wäre, jeder diese Gunst der Lage mitverantwortlich gemacht hätte; man frägt, warum hat die Inselnatur des britischen Reiches diesem zu Macht verholfen — aber Sizilien — Sardinien und Korsika? — Man weist auf den gewaltigen Verlust hin, den Spanien und Portugal an Männern (und zum Teil an ganzen Geschlechtern) durch Kriege, Inquisition, Verbannung erlitten, auf die Aufnahme von Maurenblut an Stelle des alten Blutes: Untergang war die zeitliche Folge — oder die kausale. — Die phönizischen Herrengeschlechter gründen Karthago — es dauert so lange sie da sind — danach glänzt dort wieder Sand wie vorher. — Alle diese Stichproben, Hinweise, Beispiele — mehr zu geben ist hier schlechterdings unmöglich — zeigen das Problem mit einiger Schärfe. Es ist unmöglich anzunehmen, daß die Rasse ganz ohne Einfluß auf den Ablauf dieser Geschehnisse sei. Es gilt nur abzuwägen, wieweit sie, wieweit historische Faktoren einmal vorwiegen, es ist zuzugeben, da bedarf es noch vieler Einzelarbeit und noch vieler Zusammenarbeitung. Aber der Induktionsbeweis scheint gesichert, daß die aus anderen Gründen (Individualbeobachtung, Vererbungserscheinungen, Bastardierungsergebnisse — s. Pearson, Fischer u. a. im Artikel „Rasse") als erwiesen anzunehmende Rassenverschiedenheit der einzelnen menschlichen Gruppen von gewaltigem Einfluß ist auf die Leistungen und das Schicksal der sie enthaltenden Völker und Staaten. Eine Aufnahme einer neuen Rassenkomponente und ein Ausgemerztwerden einer solchen werden sich stets geltend machen, wenn die betreffende von den anderen erblich verschieden ist — v. Luschans „Entmischung". Mit der Behauptung der alleinigen oder vorzüglichen Befähigung einer einzelnen (oder einzigen) bestimmten Rasse („nordischer" bei Germanen oder Ariern) hat das nichts zu tun.

Aber selbstverständlich erhebt sich nach Lösung jener ersten Aufgabe die zweite, zu untersuchen, wie sich bezüglich dieses Problems die einzelnen, tatsächlich gegebenen Rassen verhalten, welche Rolle also die Mischung ganz bestimmter Rassen hat. Da bemühen sich viele Autoren denn zu zeigen, daß für die Gesamtkultur des Abendlandes die „nordische Rasse" der Hauptschöpfer

und Träger, oder gar der einzige, die „conditio sine qua non" sei; aber weiter, mindestens als wichtiger Faktor, vielleicht aber auch dort als Hauptfaktor wird Zumischung nordischer Rasse auch in Vorderasien und Aegypten für die Kulturentstehung angenommen. Natürlich ist da erst recht vieles arg hypothetisch — es ist heute noch nicht möglich, derartige weitgehende Spekulationen ernsthaft zu begründen, wir wissen über die tatsächliche Rassenzusammensetzung (qualitativ und quantitativ) der Vorderasiaten und Aegypter, aber auch der Kleinasiaten, frühhistorischen Südeuropäer so wenig, daß da feste Grundlagen für „Rassetheorien" noch mangeln. Etwas mehr Aussicht haben neuere Zeiten. Da müßte man Einzelerscheinungen systematisch und zwar historisch und anthropologisch nachgehen. Woltmann (1905, 1907) hat da vieles geschaffen (es sei wiederholt, trotz der erheblichen Mängel) indem er an einzelnen Fällen den Nachweis der Rassenmischung dartat. Er glaubt zeigen zu können, daß die einzelnen großen Männer der Renaissance (Künstler, Staatsmänner, Gelehrte) nach ihrem äußeren Habitus, wie er uns in Biographien und Gemälden überkommen ist, ganz überwiegend germanischen Typus tragen (102 von 125 solcher Großen haben nach Woltmann blaue (bezw. helle) Augen gehabt, 68 von 108 blondes, 26 braunes Haar — die Zahlen, die durch historische Kritik der Quellen noch etwas modifizierbar sein dürften, sprechen trotzdem so deutlich, daß der Kern der Woltmannschen Ausführungen richtig sein muß — statt der vielen Debatten förderten uns Nachuntersuchungen und Einzeluntersuchungen an anderen Stellen, Afrika, Ostasien, viel mehr!).

Andere möchten fast alle Rassenbedeutung in diesem Sinne, ja das Vorhandensein von Rassenunterschieden leugnen, es sind Tendenzschriften (gerade wie es viele tendenziöse Germanenschwärmer gibt), so Hertz (Wien 1904) Zollschau (Wien 1911) Fishberg (München 1913) u. a.

So ist das Problem der Rassenbedeutung für Völkerschicksale noch ein außerordentlich umstrittenes, eine systematische Darstellung könnte seiner Geschichte, nicht seinem eigentlichen Inhalt gerecht werden, es mag das Wenige genügen.

Als allerletzter Punkt wäre endlich die anthropologische Seite des Verhältnisses einzelner Staaten zueinander zu nennen. Auch eine solche besteht natürlich. Wenn im Konkurrenz- und wirklichen internationalen Kampf wirtschaftliche Verhältnisse, Bodenschätze, Landesgröße, geographische Verhältnisse, Traditionswerte usw. auch sicher die Hauptrolle spielen — ein Faktor ist auch hier das anthropologische Substrat der betreffenden Staaten, bezüglich seiner anthropologischen Merkmale, der geistigen Fähigkeiten, der Fruchtbarkeit bezw. deren geringerer oder größerer Empfindlichkeit gegen Schädigungen; viele andere Merkmale kämen noch in Betracht (Rassenmischung usw.), über Einzelheiten gibt es kaum Untersuchungen.

3. **Rassenhygiene.** Die Hauptarbeit der „Rassenhygiene", so wie diese oben S. 175 definiert ist, mußte aus naheliegenden Gründen bisher darin bestehen, auf die rassenmäßige Verschlechterung hinzuweisen, die durch die kulturbedingten Ausmerzevorgänge verursacht wird. So enthalten gerade die besten rassehygienischen Arbeiten (Ploetz 1895 und 1911), Schallmayer u. a. großenteils allgemein sozialanthropologische Darstellungen und die rassehygienischen Folgerungen nur in relativ kurzer Form. Und solange unser Wissen über die betreffenden Einzelerscheinungen nicht weiter ist, wird die Hauptarbeit der Rassehygiene darin bestehen müssen, die „Idee" zu verbreiten, in unsere heutige rein und übertrieben individualistische Gedankenrichtung das Moment der Verantwortlichkeit für ferne Generationen, für die Gesamtheit der Rasse zu bringen. Das erstreben dazu gegründete Gesellschaften, die internationale Gesellschaft für Rassenhygiene mit entsprechenden Landesverbänden (Deutsche Gesellschaft für Rassenhygiene [Dr. Ploetz, München] — Eugenic Society, London usw.)

Ueber praktische Rassenhygiene ist noch wenig zu berichten. Unbewußt der sozialanthropologischen Bedeutung, aber mit Ueberlegung wurde gelegentlich auch der Mensch sozusagen gezüchtet. Die bekannten Maßnahmen der Spartaner, gewisses Verhalten der amerikanischen Sklavenbesitzer u. a. gehören hierher. König Friedrich Wilhelm I. von Preußen hat seinen langen Grenadieren den Heiratskonsens nur erteilt, wenn die betreffende Braut von entsprechender Körpergröße war. Etwas ausmerzende Wirkung haben dann natürlich auch die Verbote des Eheschlusses von geistig Unzurechnungsfähigen usw. In neuerer Zeit hat man auch Vorschläge, minderwertige Linien sich nicht mehr vermehren zu lassen, in die Tat umgesetzt, man hat Gewohnheitsverbrecher zeugungsunfähig gemacht (Zerschneidung des Samenleiters oder des Eileiters — einige Fälle in Europa, etwa gegen tausend in den Vereinigten Staaten; Literatur bei Schallmayer 1910, S. 406.)

Man hat endlich auch positive Zuchtvorschläge gemacht. Solche gehen aus von einfacheren, die Gesundheitsatteste von Ehekandidaten verlangen, oder Prämien auf Kinderreichtum wünschen — das gab es in Rom der Kaiserzeit schon und gibt es in

indirekter Form heute hier und da, wird vor allem für Frankreich viel besprochen (s. Borntraeger 1913). Aber dann gibt es Versuche und Vorschläge wirklicher Zucht; Hentschel (1911) will unter Ausschaltung all unserer Ehebräuche in einer Art Zuchtgarten Menschen züchten, v. Ehrenfels (1907) zeigt, daß erfolgreiche Zucht nur durch polygyne Fortpflanzung ausgesuchter Männer und Ausschaltung der übrigen gelingen könnte. — Das sind alles derart utopische Ideen, daß ihre Erörterung der Sache mehr schadet als gut ist; daß die ethischen Werte da mitsprechen (s. z. B. H. Ellis 1912) ist selbstverständlich — aber für den weiter Sehenden ebenso, daß da viel umzuwerten ist, daß wir uns klar machen und dauernd vor Augen halten müssen: wenn wir die Kultur bezüglich ihrer Ausmerzewirkungen weiter so schalten lassen wie bisher, gehen wir mit absoluter Sicherheit und in sich dauernd beschleunigendem Tempo als europäische Völker zugrunde; das ist nicht Pessimismus, sondern als nüchterne bindende Folgerung aus nackten Tatsachen anzusehen. — Aber andererseits besteht mit aller Gewißheit auch die Möglichkeit, jene Folge aufzuhalten und definitiv abzuwenden. Das vermag einzig und allein eine Rassenhygiene, die konsequent durchgeführt wird — unter Aenderung unserer heutigen Ansichten über Fortpflanzung; die Wichtigkeit der Rassehygiene gegenüber allen Disziplinen erhellt daraus — auch wenn das heute nur einzelne Wenige einsehen! Fr. Lenz (Archiv für Rassen- und Gesellschafts-Biologie 1912) sagt mit vollem Recht: „Eine wirklich durchgreifende Rassenhygiene ist weder durch Kreuzungen noch durch Eheverbote und Sterilisierungen zu erreichen, sondern einzig und allein durch positive Selektion der gesunden Idioplasmastämme (genealogische Linien, Referent) d. h. dadurch, daß man durch sozial-wirtschaftliche Gesetze den wirklich gesunden Erbeinheiten zur Sammlung und Vermehrung hilft, so daß sie im Laufe der Generationen an die Stelle der kranken treten."

Aber die nächste Sorge ist, daß uns überhaupt Menschenmaterial erhalten bleibt, aus dem wir sammeln und auslesen können, die größte Aufgabe der Rassenhygiene ist die, für ein Stehenbleiben des Geburtenrückganges, für ein Bestehenbleiben der Bevölkerungszunahme zu sorgen. Der Geburtenrückgang ist die schlimmste Erscheinung unter allen, die Soziologie, Anthropologie und Hygiene studieren! — Die Einzelmittel und Vorschläge sind der Zukunft überlassen — hoffentlich einer nahen!

Literatur. ***Ammon,*** *Die Gesellschaftsordnung, 3. Aufl. Jena 1900.* — ***Bertillon,*** *Instructions signalétiques. Melun 1893.* — ***Bornträger,*** *Der Geburtenrückgang in Deutschland. Würzburg 1913.* — ***Bumke,*** *Ueber nervöse Entartung. Monogr. d. Neurologie u. Psychiatrie, H.* 1. *Berlin 1912.* — ***Chamberlain,*** *Grundlagen des 19. Jahrhunderts, 10. Aufl. München 1912.* — ***v. Ehrenfels,*** *Die konstitutive Verderblichkeit der Monogamie usw. Arch. Rassen- u. Ges.-Biol.* 4, *1907.* — ***Eleutheropulos,*** *Soziologie. Natur und Staat* 6. *Jena 1904.* — ***H. Ellis,*** *Verbrecher und Verbrechen. Leipzig 1895.* — ***Derselbe,*** *Rassenhygiene und Volksgesundheit. Würzburg 1912.* — ***Fahlbeck,*** *Der Adel Schwedens. Jena 1903.* — ***Fischer,*** *Sozialanthropologie. Freiburg 1910.* — ***Galton,*** *Genie und Vererbung. Leipzig 1910.* — ***Gobineau,*** *Versuch über die Ungleichheit der Menschenrassen. Ausgabe von Schemann. Stuttgart 1907.* — ***Grotjahn,*** *Soziale Hygiene und Entartungsproblem. Handbuch der Hygiene von Weyl, Supplbd.* 4. *Jena 1904. (Lit.!)* — ***v. Gruber,*** *Kolonisation in der Heimat. München 1908.* — ***v. Gruber und Rüdin,*** *Fortpflanzung, Vererbung, Rassenhygiene. München 1911. (Katalog der Gruppe Rassenhygiene Dresden; vortreffliches Literaturverzeichnis über alle betr. Gebiete!).* — ***Heydenreich,*** *Familiengeschichtliche Quellenkunde. Leipzig 1909.* — ***Hentschel,*** *Vom aufsteigenden Leben. Leipzig 1910.* — ***Derselbe,*** *Mittgart. Dresden 1911.* — ***de Lapouge,*** *Les sélections sociales. Paris 1896.* — ***Lenz,*** *Ueber die krankhaften Erbanlagen des Mannes. Jena 1912.* — ***Lombroso,*** *Der Verbrecher. Hamburg 1887.* — ***Derselbe,*** *Genie und Irrsinn und Studien über Entartung. Leipzig (o. J.).* — ***Lorenz,*** *Lehrbuch der gesamten wissenschaftlichen Genealogie. Berlin 1898.* — ***Lundborg,*** *Medizinisch-biologische Familienforschungen innerhalb eines 2232-köpfigen Bauerngeschlechtes in Schweden. Jena 1913.* — ***Marcuse,*** *Beschränkung der Geburtenzahl usw. München 1913.* — ***Moebius,*** *Das Pathologische bei Goethe. Leipzig 1898.* — ***Derselbe,*** *Geschlecht und Entartung. Halle 1907.* — ***Mombert,*** *Studien zur Bevölkerungsbewegung in Deutschland. Karlsruhe 1907.* — ***Natur und Staat,*** *Beiträge zur naturwissenschaftlichen Gesellschaftslehre, Bd.* 1 *bis* 9. *Jena 1903 bis 1907.* — ***Niceforo,*** *Anthropologie der nichtbesitzenden Klassen. Leipzig 1910.* — ***Pearson,*** *Zweck und Bedeutung einer nationalen Rassenhygiene. Arch. f. Rassen- u. Ges.-Biol.* 5, *1908.* — ***Ploetz,*** *Grundlinien einer Rassenhygiene, Bd.* 1. *Berlin 1895.* — ***Derselbe,*** *Die Begriffe Rasse und Gesellschaft. Arch. f. Rassen- u. Ges.-Biol.* 1, *1904.* — ***Derselbe,*** *Ziele und Aufgaben der Rassenhygiene. Bericht d. deutsch. Ver. f. öffent.-Gesundheitspflege. Braunschweig 1911.* — ***Reibmayr,*** *Entwickelungsgeschichte des Talentes und Genies. München 1908.* — ***Schallmayer,*** *Vererbung und Auslese, 2. Aufl. Jena 1910.* — ***Schemann,*** *Gobineaus Rassenwerk. Stuttgart 1910 (s. auch Polit.-anthr. Rev. 1912).* — ***Sommer,*** *Familienforschung und Vererbungslehre. Leipzig 1907.* — ***Derselbe,*** *Goethe im Lichte der Vererbungslehre. Leipzig 1908.* — ***Steinmetz,*** *Nachwuchs der Begabten. Zeitschr. f. Sozialwissensch., 1904.* — ***Theilhaber,*** *Der Untergang der deutschen Juden. München 1911.* — ***Derselbe,*** *Das sterile Berlin. Berlin 1913.* — ***Wolf,*** *Der Geburtenrückgang. J*[illegible] —

Woltmann, *Politische Anthropologie. Eisenach 1903.* — **Derselbe**, *Die Germanen und die Renaissance in Italien. Leipzig 1905.* — **Derselbe**, *Die Germanen in Frankreich. Jena 1907.*

Zeitschriften: Archiv für Rassen- und Gesellschaftsbiologie (Ploetz) Leipzig. Seit 1904. — Politisch-anthropologische Revue (Woltmann jetzt Schmidt-Gibichenfels) Leipzig. Seit 1902. — Eugenic Reviews London. Seit 1909. — Dann z. T. Jahresbericht über Soziale Hygiene und Demographie (Grotjahn und Kriegel). — Zeitschrift für Sozialwissenschaft (Wolf, jetzt Pohle). — Archiv für Kriminalanthropologie und Kriminalistik (Groß).

E. Fischer.

Spallanzani

Lazaro.

Geboren am 12. Januar 1729 in Scandiano (Herzogtum Modena), gestorben am 12. Februar 1799 in Pavia, studierte in Bologna Jura und lehrte nachher Naturwissenschaft in Reggio, Pavia und Modena. 1779 durchreiste er einen Teil der Schweiz und machte 1785 eine Reise nach Konstantinopel, Korfu und Cypern. Später beschrieb er die geologischen und naturwissenschaftlichen Merkwürdigkeiten dieser und anderer von ihm besuchter Länder. Er schrieb eine Reihe von Abhandlungen über Physik, Chemie und Meteorologie, die jedoch hinter seinen naturwissenschaftlichen Arbeiten zurückstehen. Besonders wichtig sind seine Untersuchungen über die Infusionstierchen (in denen er die Urzeugung widerlegte), ferner über die Verdauung, über die Zirkulation des Blutes und die Respiration der Pflanzen. Auch entdeckte er eigenartige Sinnesorgane bei Fledermäusen; von Interesse sind heute noch seine Studien über die Regeneration der Tiere. Er ist der erste gewesen, der über den lange umstrittenen Vorgang der Zeugung und Befruchtung eine endgültige Entscheidung traf.

Seine hauptsächlichsten Werke sind: „Dei fenomeni della circulazione“, Modena 1777; „Opuscoli di fisica animale e vegetabile“, daselbst 1777, 2 Vol.; „Dissertazioni di fisica animale e vegetabile“, daselbst 1780, 2 Vol.; „Viaggi alle due Sicilie e in alcune parti degli Apennini“, 6 Bde., Pavia 1792 bis 1797 (deutsch 5 Bde., Leipzig 1795 bis 1798); „Prodromo di un' opera da imprimersi sopra le riproduzioni animali“, Modena 1768; „Contemplazione della natura, di Bonnet, con note ed osservazioni“, daselbst 1769 bis 1770, 2 Vol.; „Risultati di esperienze sopra la riproduzione della testa nelle Cumache terrestri“. Mem. della Soc. ital., tome I u. II.

Literatur. ***Pozzetti***, *Elogio storico di L. Spallanzani. Parma 1800.* — *Nouvelle Biographie Générale, Bd. 43. 1864.* — ***Carus***, *Geschichte der Zoologie. München 1872.* — ***Burckhardt***, *Geschichte der Zoologie. Leipzig 1907.*

W. Harms.

Spaltpflanzen.

Schizophyta.

Die mit vorstehendem Namen bezeichnete Gruppe wird gebildet durch einzellige oder fädige Formen. Die Fäden bestehen aus einer mäßigen Anzahl von Zellen, sind unverzweigt oder nach einem besonderen Typus verästelt. Kerne konnten in den Zellen nicht nachgewiesen werden. Die Vermehrung erfolgt durch einfache Querteilung (Spaltung) der Einzelzellen oder der Fäden. Dieser in der Regel in großem Umfange einsetzende Vermehrungsmodus hat der Gruppe den Namen gegeben. Außerdem findet sich vielfach eine Vermehrung durch kurze Fadenstücke, welche sich von der Mutterpflanze loslösen (Hormogonien oder Gonidien). Ungünstige Zeiten werden mit Hilfe von derbwandigen Dauersporen überwunden. Diese Sporen entstehen durch Umhüllung gewisser Fadenzellen usw. mit derber Haut.

Nach dieser Definition schließen wir die Haplobakterien aus, d. h. diejenigen Formen, welche in der Mehrzahl Endosporen bilden (Bd. I, S. 784). In der Literatur finden sich zahlreiche Hinweise darauf, daß das, was man gemeinhin als Bakterien bezeichnet, nicht zusammengehöre, und daß die Zusammenstellung dieser Gruppe deshalb geschehe, weil man an ihnen nicht genug sieht. Eine tatsächliche Trennung der einfachen Bakterien von anderen so genannten Formen hat unseres Wissens kaum jemand gewagt. Wir machen den Versuch in der Hoffnung, daß diese Auffassung endlich einmal in weiteren Kreisen durchdringen werde.

Die Schizophyten in engerem Sinne zerfallen in die

Schizophyceen (Cyanophyceen), das sind die meist größeren und blaugrün gefärbten Formen, die auch als die blaugrünen Algen bezeichnet werden und die

Schizomyceten (Trichobacteriaceen), das sind die kleinen farblosen Formen.

Auch diese Einteilung ist offensichtlich eine ganz künstliche, denn aus unserem Bericht wird sich z. B. ergeben, daß die farbigen Oszillarien und die ungefärbten Beggiatoen weit mehr Aehnlichkeit miteinander haben als manche Vertreter, die wir unter den blaugrünen Algen zusammenfassen. Manche Forscher wünschen natürlich die Cyanophyceen unter den Algen behandelt zu sehen. Wir sind aber nun einmal der Meinung, daß sowohl der Fortpflanzungsmodus als auch die Kernverhältnisse das verbieten, die in beiden Gruppen nicht das geringste miteinander gemein haben.

I. Cyanophyceen.

Allgemeine Morphologie, Biologie, Physiologie. Systematik. 1. Chroococaceae. 2. Oscillatoria-

ceae. 3. Nostocaceae. 4. Scytonemaceae. 5. Rivulariaceae. 6. Stigonemataceae. 7. Chamaesiphonaceae.

Die Zellen dieser Gruppe besitzen eine Zellwand, welche vielfach starken Verschleimungen unterworfen ist (s. unten). Im Zellinhalt erkennt man ohne besondere Schwierigkeit einen hell gefärbten zentralen Teil und eine Rindenschicht. Diese letztere bildet nach Alfred Fischer das umfangreiche Chromatophor. Nach anderen Autoren wären in die Rindenschicht, die aus normalem Zellplasma bestände, zahlreiche blaugrüne Chromatophoren eingelagert. Auf alle Fälle ist Chlorophyll vorhanden, welches durch einen intensiv blauen Farbstoff das Phycocyan überdeckt wird. Letzteres ist in Wasser löslich, kann durch Zerquetschen der Zellen ohne Schwierigkeiten gewonnen werden, und tritt auch in augenfälliger Weise heraus, wenn man die Pflänzchen auf Papier eintrocknen läßt. Außer dem blauen Farbstoffe ist nicht selten ein roter vorhanden, eventuell auch ein gelber. Je nach dem Dominieren eines derselben, ist die makroskopische Färbung der Cyanophyceen rein blaugrün, violett, rot oder gar strohgelb.

Nach Gaidukow sollte die Färbung abhängig sein von der Farbe des die Pflanze umgebenden Mediums, es sollte eine komplementäre Anpassung stattfinden derart, daß im blauen Licht die Zellen gelblich, im grünen Licht rötlich werden usw. Alle neueren Angaben widersprechen dem. Nach Boresch, wie nach Magnus und Schindler werden gewisse Farbenabweichungen (die gelblichen zumal) durch Mangel an Stickstoffverbindungen bedingt. In einigen vorläufigen Versuchen sah ich Oscillarien ceteris paribus im hellen Licht fast strohgelb werden, im Schatten aber tief blaugrün. Das gibt auch Kylin auf Grund besserer Versuche an.

Das Assimilationsprodukt der blaugrünen Algen scheint immer Glykogen zu sein. Dieses kann zunächst im Chromatophor abgelagert werden, wird aber vielfach auch in den zentralen Körper übergeführt und dort gespeichert. Häufig wird es in ein anderes Kohlenhydrat, das Anabaenin, umgewandelt. Es kann durch ein Enzym wieder in leicht lösliche Kohlenhydrate zurückverwandelt werden.

Die unlöslichen Anabaeninkörperchen färben sich mit vielen von den Farbstoffen, welche auch den Kern färben. Da sie oft in Form von Stäbchen oder dicken Fäden auftreten und da sie bei den Zellteilungen natürlich auch Verlagerungen unterworfen sind, rufen sie in gefärbten Präparaten Bilder hervor, welche mitotischen Kernteilungen sehr ähnlich sehen. Manche Forscher haben diese Bildungen denn auch als Mitosen angesprochen, aber ich glaube, daß Alfred Fischer recht hat, wenn er sagt, das seien nur Kohlenhydratmitosen. Danach würde der Zentralkörper der Cyanophyceenzellen aus gewöhnlichem Cytoplasma bestehen, ein Kern wie bei höheren Pflanzen wäre nicht vorhanden.

Wenn die Zelle zur Teilung schreitet, bildet sich in der Mitte der Längswand auf deren Innenseite ein Ring und dieser wächst irisblendenähnlich nach innen, um schließlich eine vollständig neue Querwand herzustellen. Der Prozeß geht ziemlich langsam vor sich und so pflegen sich bis zu 75% aller Zellen in Teilung zu befinden.

Die blaugrünen Algen finden sich wohl über die ganze Welt verbreitet; sie leben im Süß- und Seewasser. In beiden treten einzelne Formen gelegentlich im Sommer als Plankton auf (Wasserblüte). Cyanophyceen sind aber auch auf feuchtem Boden sehr häufig. Sie bevölkern Baumstämme, feuchte Wände, Blumentöpfe, Felsen usw. Besonders auffällig in ihrem Auftreten sind die Gattungen, welche sehr massenhaft Schleim führen. So z. B. Nostoc. Einzelne Arten dieser Gattung leben auf mäßig feuchtem Boden, sie trocknen bei Wassermangel zu harten, unscheinbaren Krusten ein, bei Regen schwellen sie zu Klumpen auf, die fast Faustgröße erreichen können. Eine Erscheinung, die zu mancherlei Legendenbildung Veranlassung gegeben hat.

Das massenhafte Vorkommen von Cyanophyceen an unsauberen Oertlichkeiten hat zu der Annahme Veranlassung gegeben, daß sie wohl organische Substanzen zu ihrer Ernährung bedürfen. Schon die Möglichkeit, Oszillarien usw. auf Tontellern in anorganischer Nährlösung zu ziehen, erweckten indes Zweifel. Und kürzlich zeigte Pringsheim an Reinkulturen, daß gewisse Arten jedenfalls organischer Substanz entraten können. Oes entdeckte, daß die in Symbiose mit Azolla lebenden Anabänen den Stickstoff der Atmosphäre verarbeiten. Was eventuell die blaugrünen Algen im Zusammenleben mit Bakterien und Pilzen leisten, muß untersucht werden (vgl. den Artikel „Symbiose“).

Auffallend sind manche Vertreter der Gruppe dadurch, daß sie auf ihrer Oberfläche kohlensauren Kalk in großen Massen ausscheiden, dadurch kommt dann Gesteinsbildung im großen und im kleinen zu Stande. Ebenso können Siliciumverbindungen ausgeschieden und dadurch die blaugrünen Zellen in eine steinharte Masse eingelagert werden. Das ist besonders der Fall in den heißen Quellen des Yellowstone. Hier gedeihen gewisse Cyanophyceen bei 86 bis 90°. Aehnliche, wenn auch nicht ganz so hohe Temperaturen vertragen sie in den Geysirs auf Island, in den Quellen von Karlsbad usw.

1. **Chroococaceae.** Einzellig. Die Zellen kugelig, eiförmig oder doch in irgendeiner Weise abgerundet. Bei Chroococus und seinen nächsten Verwandten (Fig. 1) sind die Zellen dünnwandig, sie fallen nach erfolgter Teilung auseinander. In der Gattung Gloeocapsa dagegen verschleimen die äußeren Wandschichten und zu-

gleich erscheinen sie geschichtet. Wenn die Zellen sich teilen, werden mehrere Generationen von Zellen durch Schleimkapseln zusammengehalten (Fig. 1), in anderen Gattungen finden sich noch andere Gruppierungen mit Hilfe des Schleimes.

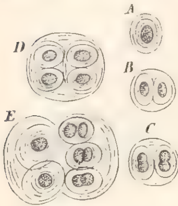


Fig. 1. Gloeocapsa in verschiedenen Entwickelungsstadien. Nach Sachs.

2. Oscillatoriaceae. Unverzweigte Fäden, welche aus zahlreichen scheiben- oder tonnenförmigen Zellen aufgebaut sind. Alle Zellen sind untereinander gleich (Fig. 2), nur die Endzellen der Fäden sind oft ein wenig kappenförmig zugespitzt.



Fig. 2. Fadenenden. 1 von Oscillaria limosa, 2 von Oscillaria princeps. Nach Kirchner.

Oscillatoria bildet blaugrüne Lager oder Decken usw., aus zahllosen Fäden zusammengesetzt. Diese führen auf geeigneten Substraten Kriechbewegungen aus, indem das voranschreitende Ende kreisende Bewegungen macht. Vermehrung erfolgt ausschließlich durch Zerfall der kriechenden Fäden in Stücke, die dann wieder zur normalen Länge heranwachsen. Die übrigen Glieder der Familie sind von Gallertscheiden umgeben, die meist geschichtet (Fig. 3) und bis an die Enden zerschlitzt sind. Bei Lyngbya (Fig. 3) ist jeder einzelne Faden von einer Scheide umgeben. Bei Isactis u. a. liegen zahlreiche Fäden in einer Scheide. Die umscheideten Formen an sich sind starr, vermehren sich aber durch bewegliche Hormogonien: Die Fäden zerfallen in kurze, aber mehrzellige Stäbchen, welche sich an ihren Enden gegeneinander abrunden (Fig. 3). Zwischen je zwei Hormogonien kann eine Zelle absterben und zusammengepreßt werden (Konkavzelle). Diese Stäbchen kriechen aus den Scheiden heraus, wachsen heran und bilden neue Scheiden. Dauerzellen sind nicht vorhanden.

3. Nostocaceae. Unverzweigte Fäden aus fast kugeligen Zellen aufgebaut, die sich perlschnurartig aneinander reihen. Sie fallen auf durch die sogenannten Grenzzellen oder Heterocysten. Diese sind in an-

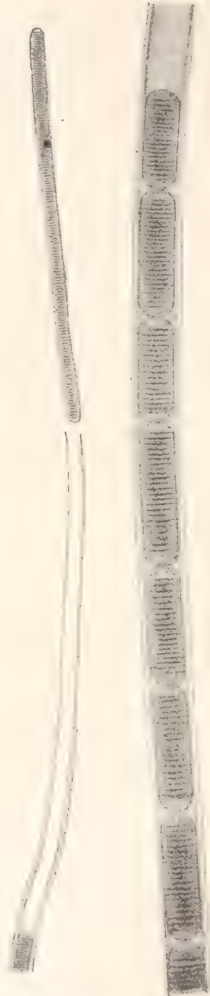


Fig. 3. Lyngbya. Hormogonien bildende Fäden. Nach Bornet.

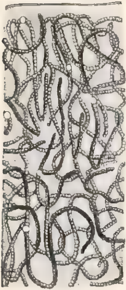


Fig. 4. Nostoc sphaericum. Stück eines Schnittes durch eine Gallertkolonie. Nach Kirchner.

nähernd gleichen Abständen (Fig. 4 u. 5) in die Fäden eingestreut; entstehen aus normalen Fadenzellen dadurch, daß diese inhaltsärmer werden und eine derbe bräunliche Membran erhalten. Die Funktion der Heterocysten ist trotz vielfacher Hypothesen nicht geklärt. Die Fäden sind bei Nodularia, Anabaena u. a. nur in dünne Schleimhüllen eingeschlossen und deswegen nicht zu größeren Verbänden vereinigt. Bei Nostoc dagegen sind sie gekröseähnlich gewunden und in dichte Schleimmassen eingebettet (Fig. 4).

Zwecks Vermehrung zerfallen die Nostocfäden unter Ausschaltung der Grenzzellen in kurze gerade Stücke, die aus dem Schleim herauskriechen. Diese Hormogonien (Fig. 5, $_{1-4}$) umgeben sich wieder mit Schleim, verlängern sich, bilden Grenzzellen und lassen auch alsbald die eigenartigen Fadenkrümmungen wieder in die Erscheinung treten (Fig. 5, $_{3,\ 4}$.).

Unter ungünstigen Bedingungen werden Sporen gebildet; das sind derbwandige reservestoffführende Gliederzellen der Fäden, welche bei den verschiedenen Gattungen eine etwas verschiedene Lage zu den Grenzzellen haben und auch früher oder später aus dem Fadenverbande sich lösen (Fig. 5, 8). Auf geeignetem Substrat keimen sie unter Sprengung der braunen Haut (Fig. 5, $_{5-9}$).

4. Scytonemaceae. Fäden, welche in mehr oder minder derbe und verschieden

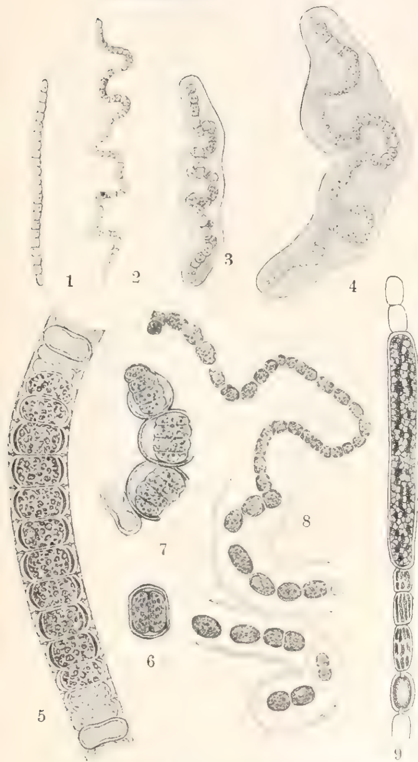


Fig. 5. 1 bis 4 Nostoc, Hormogonien keimend. Nach Janczewski. 5 bis 7 Nodularia, Sporenbildung und Keimung. Nach Bornet. 8 Nostoc, Sporenbildung. Nach Bornet. 9 Aphanizomenon flos aquae, Sporenbildend. Nach Kirchner.

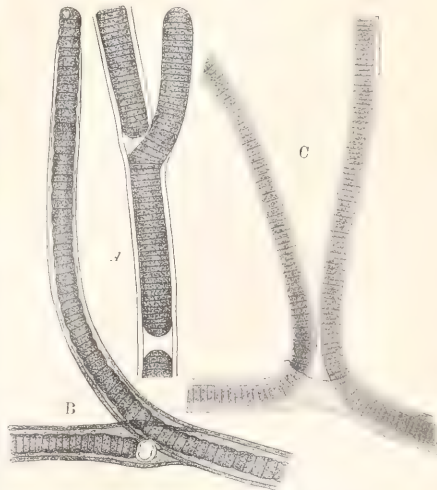


Fig. 6. Verzweigungen. A Plectonema Wollei, B Tolypothrix, C Plectonema mirabile. Nach Kirchner und Bornet.

geformte und gefärbte Scheiden eingeschlossen sind. Die Fäden besitzen größtenteils Grenzzellen. Ihre Verzweigung ist eigenartig. Die Heterocysten sind offenbar mit den Gallertscheiden ziemlich fest verklebt. Wenn nun die Fäden sich unter Zellteilung verlängern, wird der Raum zwischen zwei Grenzzellen zu knapp, die Fäden biegen seitlich aus und treten aus ihren Scheiden hervor, um alsbald von neuen Scheiden umgeben zu werden. Die Fadentrennung erfolgt häufig unmittelbar unter einer Heterocyste und dann entsteht ein Bild wie Figur 6, A, B, oder aber die Fäden

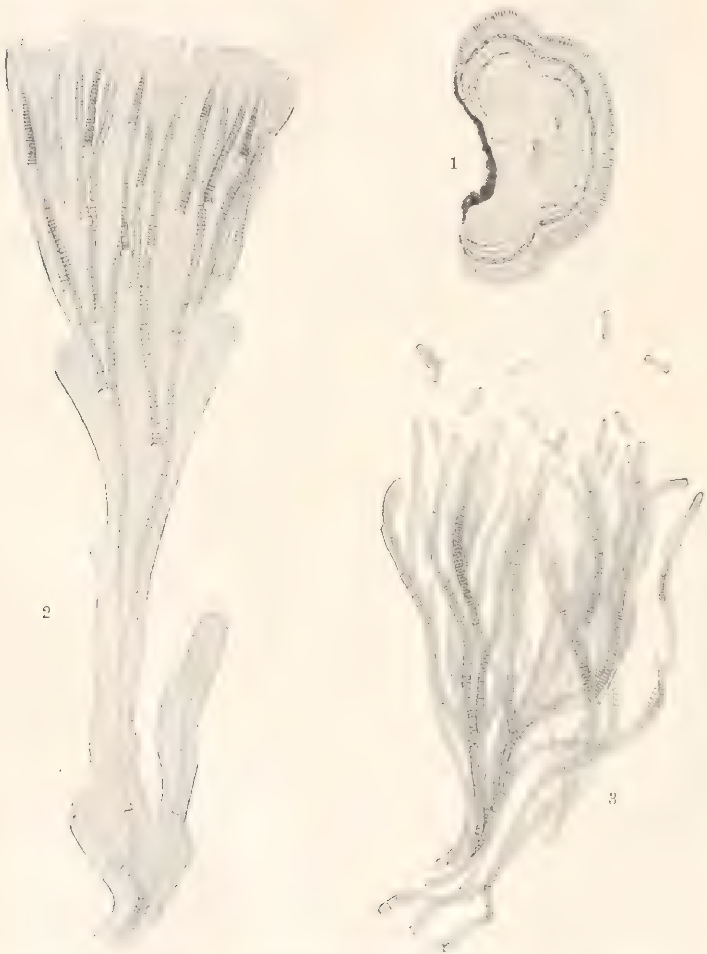


Fig. 7. 1 Polster von Rivularia, 2 Stück daraus vergrößert, 3 Calothrix, Hormogonien bildend. Nach Bornet.

zerbrechen beliebig und treten dann an irgendeiner Stelle aus ihrer Scheide (Fig. 6, C). — Hormogonien wie bei Lyngbya.

5. **Rivulariaceae.** Sie bilden mit Vorliebe regelmäßig gerundete Gallertpolster oder Krusten (Fig. 7, 1), in welchen die Fäden eine radiale Anordnung aufweisen. Diese selbst sind alle an ihrer Basis mit einer Grenzzelle versehen, sie endigen peitschenähnlich in ein mehr oder minder langes Haar. Jeder Faden ist umscheidet, und dadurch, daß die Scheiden zusammenschließen, bilden sie jene oben genannten Polster. Verzweigung wie bei Scytonema (Fig. 7, 2).

Vermehrung: durch Hormogonien, welche an den Enden der Fäden gebildet werden, nachdem deren haarartige Verlängerungen abgeworfen wurden. Die Hormogonien treten einzeln oder in Gruppen aus den Scheiden heraus (Fig. 7, 3). Zur Ruhe gekommen umgeben sie sich sehr bald mit einer Gallertscheide, wachsen an der Spitze zum Haar aus und verzweigen sich dann sehr rasch und reichlich (Fig. 5).

6. **Stigonemataceae.** Diese Familie weicht dadurch, daß sie echte Verzweigungen hat, von den übrigen blaugrünen Algen ab. Abgesehen von ihrer Färbung ähneln die Fäden den analogen kriechenden und verzweigten Organen von grünen oder blauen Algen ziemlich weitgehend.

7. **Chamaesiphonaceae.** Die Zellen leben einzeln oder kombinieren sich zu kleinen ein- oder mehrschichtigen Krusten, Polstern usw. Hormogonien und Dauerzellen fehlen.

Literatur. ***K. Boresch,*** *Die Färbung von Cyanophyceen und Chlorophyceen in ihrer Abhängigkeit vom Stickstoffgehalt des Substrates. Pringsheims Jahrb.* **52**, *145, 1913.* — ***E. Bornet und G. Thuret,*** *Notes algologiques. Paris 1876/80.* — ***C. Correns,*** *Ueber die Membran und die Bewegungen der Oscillarien. Ber. d. d. bot. Ges., 1897,* **15**, *139.* — ***A. Fischer,*** *Untersuchungen über den Bau der Cyanophyceen und Bakterien. Jena 1897.* — ***M. Gomont,*** *Monographie des Oscillariées. 1893.* — ***G. Hieronymus,*** *Beiträge zur Morphologie und Biologie der Algen. Beiträge z. Biologie d. Pfl. (Cohn) 1892,* **5**, *461.* — ***Janczewski,*** *Observations sur la reproduction de quelques Nostachacées. Ann. des sc. nat. Bot.* **18**, *5. sér. 19.* — ***O. Kirchner,*** *Schizophyceae. Engler-Prantl, natürliche Pflanzenfamilien* **1**, *1 a.* — ***Derselbe,*** *Kryptogamen-Flora von Schlesien. II, 1878.* — ***Harald Kylin,*** *Ueber die Farbe der Florideen u. Cyanophyceen. Svensk bot. Tidskrift, 1912,* **6**, *531.* — ***C. Nägeli,*** *Gattungen einzelliger Algen. 1849.* — ***Adolf Oes,*** *Ueber die Assimilation des freien Stickstoffs durch Azolla. Ztschr. f. Botanik, 1913,* **5**, *145.* — ***E. G. Pringsheim,*** *Kulturversuche mit chlorophyllführenden Mikroorganismen III. Mitteilung. Zur Physiologie der Schizophyceen. Beitr. z. Biologie d. Pflanzen, 1913,* **12**, *49.* — ***L. Rabenhorst,*** *Flora europaea Algarum II. Leipzig 1865.* — ***B. Schindler,*** *Ueber die Farbenveränderungen der Oscillarien. Ztschr. f. Botanik* **5**, *Heft 6, 1913.*

F. Oltmanns.

II. Trichobacteriaceen.

Allgemeine Morphologie, Biologie, Physiologie. Systematik: 1. Beggiatoaceen. 2. Chlamydobacteriaceen. 3. Spirotrichaceen.

Die zylindrischen oder scheibenförmigen etwa 0,5 bis 5 μ breiten Zellen sind zu langen Fäden aneinander gereiht, die meist in röhrigen Scheiden stecken. Die Organisation der Zellen entspricht der der echten Bakterien. Zweifellose Zellkerne sind nicht gefunden worden, doch kommen z. B. bei der sehr großen Beggiatoa mirabilis und bei Cladothrix dichotoma stärker färbbare Körnchen vor, die wie bei den Bakterien (s. Bd. I S. 779) verschieden beurteilt werden; doch ist bemerkenswert, daß bei jener eine Teilung der Körnchen im Leben beobachtet wurde. Das Plasma ist homogen oder aber von Vakuolen durchsetzt. Chromatophoren und Farbstoffe fehlen, die Fäden sind also farblos. Eigenartig ist das Vorkommen von Schwefel bei den Beggiatoaceen, der in Form kleiner, weicher Körnchen in das Plasma eingelagert wird. Bei der dicken Beggiatoa mirabilis ist ein stärkeartiger Reservestoff beobachtet. Bei Cladothrix hat man zwischen den Zellen feine Verbindungsfäden gesehen, die als Plasmodesmen gedeutet worden sind. Die Teilung der Zellen erfolgt im wachsenden Faden quer zur Längsachse, die Scheidewand wird bei der genauer untersuchten Beggiatoa mirabilis irisblendenartig angelegt. Die scharf umrissene Scheide ist an jungen Fäden oder an den jungen Enden fortwachsender Fäden zart und durchsichtig, wird aber mit dem Alter fester und derber. Sie verändert sich besonders auffallend bei den typischen eisenliebenden Formen durch starke Einlagerung von Ocker. Die Fäden stecken gewöhnlich frei in der Scheide; ältere Stücke enthalten oft keine lebenden Zellen mehr. Eine sehr zarte Scheide besitzt Thiothrix, gar keine Beggiatoa. Bei Thioploca stecken die strang- oder seilartigen aus Einzelfäden bestehenden Bündel in einer dicken gemeinsamen Gallertscheide, die an manchen Stellen etwas eingeschnürt ist. Die meisten Trichobakterien sitzen unter natürlichen Verhältnissen mit einem Ende fest und wachsen am anderen weiter, zeigen also einen Gegensatz von Basis und Spitze. Bei Leptothrix sideropous und Megalothrix discophora wird sogar eine basale Haftscheibe ausgebildet. Die Beggiatoaceen sind frei und nicht polar gebaut.

Verzweigung der Fäden findet sich regelmäßig bei Cladothrix, Clonothrix, selten bei Leptothrix, Megalothrix, Spirophyllum, bei den anderen Formen fehlt sie. Abgesehen von Spirophyllum, wo ihre Entstehung unbekannt ist, kommt sie dadurch zustande, daß sich eine einzelne Zelle aus dem Faden-

verbande seitlich herausschiebt (Fig. 8, 1), die Scheide durchbricht und zu einem Aste auswächst, der demgemäß mit dem Tragfaden nicht organisch verbunden, sondern



Fig. 8. 1. Cladothrix. Nach A. Fischer. 2—4 Crenothrix polyspora. Nach Molisch.

ihm nur angeklebt ist (gleitende Verzweigung) genau wie bei den Scytonemeen (Fig. 6). Eine büschelige Verzweigung kann oft dadurch vorgetäuscht werden, daß sich junge Individuen an einem alten Faden festsetzen und hier auswachsen. Die Fäden der Fadenbakterien sind starr und unbeweglich, mit Ausnahme von Beggiatoa und Thioploca. Die Beggiatoen gleiten unter linksläufiger Drehung um die Längsachse auf fester Unterlage oder pendeln, wenn ein Ende frei ins Wasser ragt, unregelmäßig. Beggiatoa mirabilis ist ganz ausgeprägt flexil und zeigt krampfartige Windungen, außerdem Kontraktionswellen, die über ihre Oberfläche hinlaufen. Die Fäden von Thioploca gleiten unabhängig voneinander in der Gallertröhre und können auch aus ihrer Oeffnung ein Stück heraustreten, um sich dann wieder zurückzuziehen.

Vermehrung kann überall in großem Umfange erzielt werden, indem die Fäden zerbrechen und die Bruchstücke fortwachsen. Beggiatoa vermehrt sich nur auf diese Weise. Bei Thiothrix können die Stücke, die sich an dem Ende der Fäden ablösen, einige Zeit umherkriechen, bevor sie sich an einem Ende festheften und auswachsen. Bei den übrigen Formen kommt noch eine Vermehrung durch einzelne frei werdende Zellen hinzu. Am einfachsten geschieht dies, indem die Glieder des Fadens sich voneinander loslösen, sich eventuell abrunden und aus der Scheide heraustreten. Oft (wie bei Creno-, Clono-, Phragmidiothrix) teilen sich diese Zellen vorher noch ein oder mehrere Male, so daß kleinere Körner entstehen (Fig. 8, 2—4). Alle diese Keimzellen sind nicht mit schützenden Hüllen umgeben, infolgedessen auch nicht widerstandsfähig, wie die Bakteriensporen (von denen sie ja auch durch ihre Entstehung verschieden sind); sie keimen ohne weiteres aus, wenn sie sich irgendwo festgesetzt haben. Meist sind sie unbeweglich, also Aplanosporen; nur bei Cladothrix und Leptothrix schwimmen sie, bei ersterer mit Hilfe eines seitlich inserierten Geißelbüschels, bei letzterer auf unbekannte Weise, sind also Schwärmsporen.

In die vorstehende Schilderung typischer Fadenbakterien fügen sich zwei merkwürdige Gattungen nicht ohne weiteres ein, die aber doch vorläufig hier unterzubringen sind, nämlich Spirophyllum und Gallionella. Bei beiden morphologisch und entwickelungsgeschichtlich nicht hinreichend bekannten Arten ist bisher eine Gliederung in einzelne Zellen nicht erkennbar gewesen. Spirophyllum stellt ein um seine Achse gedrehtes Band, Gallionella einen schraubigen Faden dar, der meist um sich selbst gewunden die Gestalt eines Zopfes annimmt.

Alle Trichobakterien leben untergetaucht im Wasser. Sie kommen sowohl im süßen wie im salzigen vor, doch ist bemerkenswert, daß die eisenliebenden Formen auf das süße Wasser beschränkt sind. Sie leben entweder frei im Schlamm (Thioploca) oder auf demselben in Form spinnewebiger Ueberzüge (Beggiatoa), oder aber sie sind auf dem Boden, an Steinen, Pflanzenresten und lebenden Wasserpflanzen festgewachsen (Fig. 9) und bilden dann Ueberzüge, Räschen, Flöckchen oder auch längere flutende Büschel wie die übrigen Formen, mit Ausnahme von Spirophyllum und Gallionella, die in zusammenhängenden Massen oder als Bodensatz vorzukommen scheinen. Auch Leptothrix kann so wachsen. Im allgemeinen kommen sie nicht in stark fauligen Gewässern fort, meist sind sie sogar wahrscheinlich Lebewesen, die sich auf ähnliche ureinfache Weise ernähren wie die grünen Pflanzen. Die Mehrzahl sind ernährungsphysiologische Sonderlinge, nämlich Eisen- oder Schwefel-

organismen. Leptothrix ochracea und Leptothrix sideropous, Crenothrix polyspora, Clonothrix fusca, Spirophyllum ferrugineum und Gallionella ferruginea kommen in der Natur stets in wenig verunreinigten, eisenhaltigen und kohlensäurereichen Wässern vor, wo sie rostrote oder braune Ueberzüge oder einen



Fig. 9. Cladothrix dichotoma, auf dem Blatt einer Wasserpflanze. Nach Molisch.

lockeren Bodensatz bilden, siedeln sich auch (wie besonders Crenothrix und Clonothrix) in Brunnen, Wasserleitungen, Sammelbecken als höchst unerwünschte Gäste an. Die Beggiatoaceen sind auf H_2S-haltiges Wasser angewiesen, finden sich also in stehenden Gewässern, in Schwefelquellen, auch im Meere, wo sie auf dem „toten Grund" besondere Ueppigkeit entwickeln. Etliche Arten Fadenbakterien ist es geglückt rein zu züchten, so daß man ihren Stoffwechsel näher kennt. Cladothrix dichotoma erwies sich als gewöhnlicher Saprophyt, was auch zu ihrer Lebensweise in verhältnismäßig unreinem Wasser stimmt. Die Eisenbakterie Leptothrix ochracea ließ sich ebenso ernähren, also ohne Eisen, kommt aber in der Natur nur in Eisenwässern vor. Dagegen ließ sich bei Spirophyllum zeigen, daß die Oxydation des Eisenoxyduls zu Eisenoxyd für seine Existenz notwendig ist, und daß es außerdem Kohlensäure assimilieren kann, also vollständig autotroph ist (vgl. den Artikel „Bakterien"). Beggiatoa und Thiothrix verhalten sich ganz entsprechend: H_2S unerläßlich, Kohlensäureassimilation, vollständige Autotrophie.

Die drei Familien, in die sich die Trichobacteriaceen gliedern lassen, zeigen unter sich ziemliche Verschiedenheiten und lassen sich auch nicht gleich eng an die Cyanophyceen anschließen. Am engsten ist der Anschluß bei den Beggiatoaceen.

1. **Beggiatoaceae.** Beggiatoa stellt, wie oben schon bemerkt, geradezu eine farblose Oscillatoria dar (vgl. Fig. 2). Thioploca entspricht Microcoleus oder Hydrocoleum. Die Vertreter dieser Familie sind stets unverzweigt, bilden nie einzellige Vermehrungsorgane und zeigen entweder immer oder in gewissen Entwickelungsstadien Kriechbewegung. Alle sind sie Schwefelorganismen.

Beggiatoa kriecht frei und hat keine Scheide. Bei Thioploca sind die Fäden zu vielen in eine gemeinsame Gallerthülle eingeschlossen, in der sie gleiten. Thiothrix ist dünn bescheidet, unbeweglich, sitzt fest und gliedert an den Fadenenden mehrzellige Stücke ab, die eine Weile kriechen.

2. **Chlamydobacteriaceae.** Die aus zylindrischen oder scheibenförmigen Zellen bestehenden, einfachen oder verzweigten, festsitzenden Fäden stecken in deutlichen, oft stark entwickelten Scheiden. Sie vermehren sich durch einzelne aus den Scheiden austretende nackte Zellen, die unbeweglich sind oder schwärmen. Leptothrix ochracea ist einfach, selten verzweigt, hat anfangs helle dünne, später dickere rostgelbe Scheiden und vermehrt sich durch stabförmige Schwärmer. Aeltere Scheiden sind leer. Aus ihnen besteht oft gänzlich der ockerige Bodensatz von Eisengewässern (Fig. 10), auch in manchen Proben von Sumpferz werden sie gefunden. Die ebenfalls eisenliebende Leptothrix sideropous sitzt mit breiter Haftscheibe an Wasser-



Fig. 10. Leptothrix ochracea, Scheidenbruchstücke. Nach A. Fischer.

pflanzen. Ihr steht nahe die Megalothrix discophora, deren verzweigte Fäden auf runder Haftscheibe sitzen. Cladothrix ist regelmäßig verzweigt, besitzt farblose Scheiden und vermehrt sich durch eiförmige Schwärmsporen. Cladothrix dichotoma, gemein in Sumpfwasser (Fig. 8_1, 9), Cladothrix natans (= Sphaerotilus natans), häufiger Abwasserpilz mit mehr schleimigen Scheiden. Die unverzweigten Fäden von Crenothrix polyspora verbreitern sich nach der Spitze zu und bilden hier nach Quer- und Längsteilungen der scheibenförmigen Zellen eine große Zahl runder Aplanosporen. Daneben kommen schmälere Fäden, deren Zellen sich nur einmal längs teilen, und solche vor, deren Zellen direkt zu dementsprechend größeren Sporen sich umwandeln (Fig. 8, $_{2-4}$). Mit diesem häufigsten Wasserleitungs- und Brunnenpilz findet sich oft vergesellschaftet Clonothrix fusca, deren verzweigte Fäden sich nach oben verjüngen und aus kürzeren Seitenzweigen Aplanosporen entlassen, die nach einmaliger Längsteilung der Fadenzellen

entstehen. Die marine Phragmidiothrix multiseptata ist Crenothrix sehr ähnlich. In ihren Scheiden entstehen durch rege Teilung paketartige Zellmassen, die nicht sofort entleert werden.

3. **Spirotrichaceae.** Eisenbakterien spiralig gedrehten oder gewundenen Baues, ohne erkennbare Gliederung in einzelne Zellen, unbeweglich, ohne Vermehrungsorgane. Gallionella ferruginea stellt dünne strukturlose, im Alter rostbraun werdende, stark mit Ocker inkrustierte Fäden dar, welche meist spiralig um sich selbst gedreht sind. Solche Zöpfe werden massenhaft im Bodensatz von Eisenwässern angetroffen, häufig zusammen mit Spirophyllum ferrugineum. Dies ist ein anscheinend ganz homogenes, anfangs farbloses, später rotbraunes, um seine Längsachse gedrehtes Band, das sich auch verzweigen kann (Fig. 11). Beide finden sich auch in Wasserleitungen.

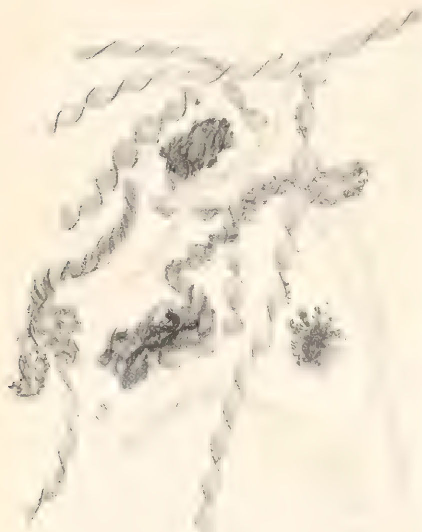


Fig. 11. Spirophyllum ferrugineum.

Die vielfach mit den Fadenbakterien in Zusammenhang gebrachten Streptotricheen (= Actinomyceten) sind dünnfädige Fadenpilze, die mit der vorliegenden Gruppe nichts zu tun haben.

Literatur. ***W. Benecke.*** *Bau und Leben der Bakterien. Leipzig u. Berlin 1912.* — ***A. Fischer,*** *Vorlesungen über Bakterien. Jena 1903.* — ***Schmidt und Weis,*** *Die Bakterien. Jena 1902.* — ***H. Molisch,*** *Die Eisenbakterien. Jena 1910.* ***W. Migula,*** *System der Bakterien. II. Jena 1900.* — ***Lafar's*** *Handbuch der technischen Mykologie. 2. Aufl., Bd. 3. Jena 1904—1906.* — ***R. Lieske,*** *Jahrbücher für wissenschaftliche Botanik. Leipzig Bd. 49, 1911, S. 91.* — ***S. Winogradski,*** *Beiträge zur Morphologie und Physiologie der Bakterien. I. Schwefelbakterien. Leipzig 1888.* — ***R. Kolkwitz,*** *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft. Bd. 30, S. 662, 1912.* — ***F. Keil,*** *Beiträge zur Physiologie der farblosen Schwefelbakterien. Hallische Dissertation 1912.*

Miehe.

Speichel.

1. Bedeutung des Speichels. 2. Anatomie und Histologie der Speicheldrüsen: a) Lage und Einteilung. b) Histologie des Drüsengewebes. c) Blutgefäße und Nerven. 3. Vergleichende Anatomie und Physiologie. 4. Die Vorgänge bei der Absonderung. 5. Verhalten der Blutgefäße. 6. Innervation der Speicheldrüsen. 7. Sekretionsreize. 8. Der Speichel: a) Zusammensetzung und Menge. b) Speichelverdauung.

1. **Bedeutung des Speichels.** Der Speichel hat eine doppelte Aufgabe. In erster Linie wirkt er auf die genossene Nahrung ein. Hierbei ist er hauptsächlich mechanisch wirksam, indem er den Bissen durchfeuchtet und schlüpfrig macht, so daß er leicht geschluckt werden kann. Gleichzeitig vermag er chemisch zu wirken, indem er Stärke verzuckert. Zweitens dient der Speichel zum Schutz der Mundhöhle. Substanzen, welche die Schleimhaut und die Zähne reizen, wie z. B. Säuren, werden durch ihn verdünnt, und feste Partikel können mit seiner Hilfe aus dem Mund entfernt werden.

2. **Anatomie und Histologie der Speicheldrüsen.** 2a) Lage und Einteilung. Der Mundspeichel stammt aus den in der Umgebung der Mundhöhle gelegenen großen Speicheldrüsen und aus kleineren Drüsen, welche sich in der Zunge, den Wangen, im Gaumen und in den Lippen befinden.

Die großen Speicheldrüsen sind paarig angeordnet und senden ihr Sekret durch Ausführungsgänge in die Mundhöhle. Von ihnen ist die vor dem Ohr gelegene Parotis beim Menschen die größte (Fig. 1). Von ihrem vorderen Abschnitt geht ihr Ausführungsgang nach vorn, dringt durch die Wange und mündet in der Mundhöhle gegenüber dem zweiten oberen Mahlzahn. Die Submaxillaris (Fig. 1 und 2) ist als rundliches Organ am inneren Rand des Unterkiefers fühlbar, ihr Ausführungsgang mündet am Boden der Mundhöhle zur Seite des Zungenbändchens. Die Sublingualis (Fig. 2) ist die kleinste von ihnen und am weitesten nach vorn gelegen; ihre Gänge münden neben demjenigen der Submaxillaris.

Ellenberger und Illing fassen die

Submaxillaris und Sublingualis als Glandulae mandibulares zusammen. Erstere nennen sie Mandibularis propria, letztere Sublingualis monostomatica, wenn sie nur einen Ausführungsgang hat (Ranviers Retrolingualis), Sublingualis polystomatica dagegen, wenn sie mehrere Ausführungsgänge besitzt. Während Parotis und Submaxillaris bei allen untersuchten Säugern vorhanden sind, ist dies bei den beiden Sublinguales nicht der Fall. Die Sublingualis monostomatica vielmehr fehlt den Einhufern und oft auch dem Menschen, die Sublingualis polystomatica ist unter den Säugetieren bei Fleischfressern wenig entwickelt. Zu den genannten Drüsen kommen bei einigen Tieren noch Speicheldrüsen in der Augenhöhle hinzu, wie z. B. bei Hund und Katze die Orbitalis.

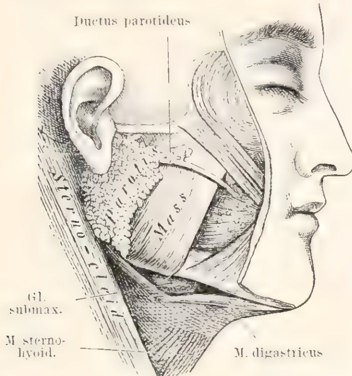


Fig. 1. Parotis des Menschen mit dem Ausführungsgang (Ductus parotideus). Nach Gegenbaur.

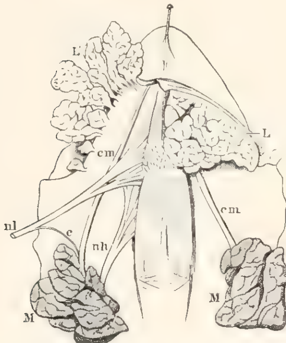


Fig. 2. Submaxillaris (M) und Sublingualis (L) des Menschen, letztere rechterseits (L') zurückgeschlagen, (Ansicht von unten). nl Nervus lingualis, nh Nervus hypoglossus, c Chorda tympani, cm Ausführungsgang der Submaxillaris. Nach Ranvier. Aus Metzner (Nagels Handbuch der Physiologie).

Die Einteilung der Drüsen gründet sich auf die Beschaffenheit ihrer Sekrete. Dieses ist entweder „serös", d. h. wässerig und vor allem eiweißhaltig, oder es ist fadenziehend, muzinhaltig. Ersterenfalls spricht man von serösen oder Eiweißdrüsen, letzterenfalls von mukösen oder Schleimdrüsen. Drüsen, welche beide Sekretarten liefern, sind gemischte. Als Eiweißdrüse gilt die Parotis des Menschen und der Tiere sowie die Submaxillaris des Kaninchens. Als reine Schleimdrüse gilt nach Ranvier und nach Illing die Sublingualis polystomatica der Nager und auch die Sublingualis monostomatica einiger Nager. Die Submaxillaris des Menschen und wohl der meisten Tiere ist gemischt, ebenso die Sublingualis, wobei im einzelnen Fall der seröse oder muköse Typus vorherrscht.

2b) Histologie des Drüsengewebes. Die Drüsen sind aus einzelnen Läppchen zusammengesetzt, welche durch Bindegewebe miteinander verbunden sind. Aus jedem Läppchen kommt ein kleiner Ausführungsgang. Diese kleinen Gänge vereinigen sich zum großen Drüsengang. Das eigentliche sezernierende Drüsengewebe bildet Anschwellungen, welche bläschenartig den Gängen aufsitzen.

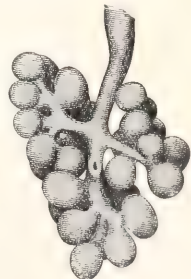


Fig. 3. Modell eines Läppchens aus der Parotis des Menschen. Nach Maziarski. Aus Metzner (Nagels Handbuch der Physiologie).

Figur 3 zeigt die Rekonstruktion eines Läppchens der Parotis, Figur 4 eine solche der Submaxillaris des Menschen. Bei ersterer handelt es sich um den Typus acinöser Drüsen (gestielte Acini, Drüsenepithel ausschließlich in den Acini, Stiele mit gang-

artigem Epithel), bei der anderen um den Typus alveolär-tubulöser zusammengesetzter Drüsen (Drüsenepithel nicht nur in den Alveolen, sondern auch in den langen Schläuchen; nach Metzner). Hinsichtlich dieser beiden Typen bestehen in der Säugetierreihe Verschiedenheiten selbst unter gleichbenannten Drüsen.



Fig. 4. Modell der Submaxillaris des Menschen (schleimiger Teil). Nach Maziarski. Aus Metzner (Nagels Handbuch der Physiologie).

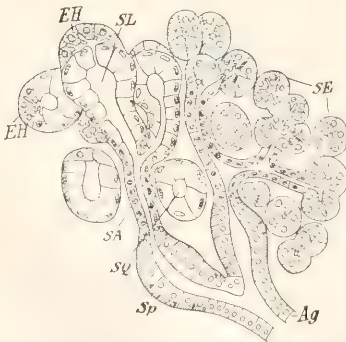


Fig. 5. Schema einer gemischten Speicheldrüse (Submaxillaris des Menschen). Ag Ausführungsgang eines Endläppchens, Sp Speichelrohr, SA Schaltstück, SL ein Schleimschlauch der Länge nach, SQ quergetroffen, EH Halbmonde, SE seröse Alveolen. Nach Schaffer. Aus Biedermann (Wintersteins Handbuch der vergleichenden Physiologie).

Verfolgt man den feineren Bau zunächst des ausführenden Kanalsystems von der Mündung rückwärts, so tragen die größeren Gänge und ihre Verzweigungen ein meist zweireihiges oder zweischichtiges zylindrisches Epithel. Die darauf folgenden kleineren Gänge werden in der Parotis und Submaxillaris als „Speichelröhren" bezeichnet und haben ein Zylinderepithel mit zumeist basalwärts gelegenen, in Reihen angeordneten Körnchen, die man schon am frischen Präparat sieht („Stäbchenepithel", Fig. 6). Hieran schließen sich die Schaltstücke mit niedrigem, einschichtigem Epithel. Die Schaltstücke nun führen in die Endbläschen (Acini, Alveoli), deren Wandung das spezifische Drüsenepithel trägt (Fig. 5).

Die Drüsenzellen selbst sitzen einer Membrana propria auf, deren Innenfläche meistens noch netzartig untereinander verbundene Zellen („Korbzellen") trägt. Die Drüsenzellen umgrenzen mit ihren Kuppen die enge Lichtung des Acinus bezw. Alveolus, den Raum also, in den sich ihr Sekret ergießt. Zwischen die Eiweißzellen führen vom Lumen aus kapillare Gänge (Sekretkapillaren, Fig. 7).

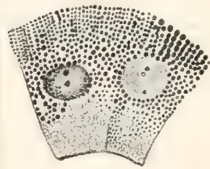


Fig. 6.



Fig. 7.

Fig. 6. Zwei Zellen einer Speichelröhre der Parotis des Hundes nach 24-stündigem Hungern. Fixiert in Altmanns Osmiumgemisch und mit Säurefuchsin gefärbt. Nach Mislawsky und Smirnow. Aus Oppel (Lehrbuch der vergleichenden mikroskopischen Anatomie).

Fig. 7. Submaxillaris des Kaninchens. Endigungen der Drüsengänge. Nach Golgis Chrom-Osmium-Silbermethode. Nach Retzius. Aus Biedermann (Wintersteins Handbuch der vergleichenden Physiologie).

Schon an frischen Zupfpräparaten und an Gefrierschnitten sieht man sowohl in den Eiweißzellen, als auch in den Schleimzellen außer dem Kern kleine, dicht gelagerte Granula oder Sekrettropfen. Die Eiweißgranula haben ein etwas stärkeres Lichtbrechungsvermögen als die Schleimgranula. Sie können, was in sekretgefüllten Zellen meistens der Fall ist, über die ganze Zelle verteilt sein (Fig. 8), oder nur in dem nach der Spitze zu gelegenen Zellteil liegen („Sekretsammelstelle").

Diese Granula sind das Material, aus dem die spezifischen Sekretbestandteile stammen.

Das Protoplasma hat die Architektur eines Wabenwerkes, in dessen Hohlräumen die Granula liegen. Da, wo solche fehlen, ist es verdichtet und enthält oft kleinste Körnchen oder auch Körnchenreihen.

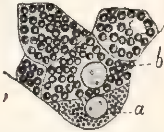


Fig. 8. Submaxillaris des Hundes. Nach einem frischen Präparat. Einige Schleimzellen (b) mit Granula. Eine Halbmondzelle (a). Nach Noll. Aus Ellenberger (Handbuch der vergleichenden mikroskopischen Anatomie).

Man kann die Eiweißzelle von der Schleimzelle mikrochemisch unterscheiden, indem die Eiweißzelle bei Essigsäurezusatz sich trübt, die Schleimzelle dagegen heller wird. Am leichtesten ist die Unterscheidung an der fixierten und gefärbten Drüse im Schnittpräparat. Im allgemeinen nämlich liegen die Kerne der Schleimzellen mehr basalwärts und sind abgeplattet, die Schleimgranula sind weniger gut fixierbar, so daß also die Schleimzellen heller erscheinen als die Eiweißzellen. In den gemischten Drüsen finden sich beide Zellarten vor.

Seit langer Zeit ist es eine strittige Frage, ob diejenigen Schleimdrüsen, welche die sogenannten Halbmonde besitzen, wie z. B. die Submaxillaris, den gemischten Drüsen zuzuzählen sind. Zurzeit halten die meisten Autoren die Halbmonde in allen Drüsen für Komplexe von Zellen sui generis, d. h. für Zellen, die mit Schleimzellen nichts zu tun haben. Viele betrachten sie direkt als Eiweißzellen, hauptsächlich deshalb, weil sie, wie die Eiweißzellen, Sekretkapillaren besitzen. Für bestimmte Drüsen wird dagegen von anderen an der Ansicht Stöhrs festgehalten, daß die Halbmonde sekretleere Schleimzellen seien, jedenfalls keine Eiweißzellen, unter anderen Gründen deshalb, weil gewisse Halbmonde (submaxillaris, orbitalis des Hundes) keine eigentlichen Eiweißgranula haben (vgl. Fig. 8).

Die Speicheldrüsen sind das klassische Objekt, an dem R. Heidenhain die ersten Beobachtungen über die Veränderungen machte, welche die Drüsenzellen während ihrer Tätigkeit erleiden (Fig. 9). Wenn man nämlich nach längerwährender Sekretion, welche man durch Nervenreizung oder durch Pilocarpin erzielt, eine Drüse mikroskopisch untersucht, dann findet man folgendes: Die Drüsenzellen sind kleiner geworden, die Sekretgranula haben an Zahl und Größe abgenommen, so daß die basale Zone granulafrei ist, ein Vorgang, den Langley an der lebenden Parotis des Kaninchens verfolgt hat. Bei äußerst gesteigerter Tätigkeit kann die ganze Zelle sogar granulafrei werden. Gleichzeitig wird der Kern etwas voluminöser und rückt, was besonders bei Schleimzellen deutlich ist, von der Basis nach dem Zellinnern. Die Lumina der Acini sind vielfach erweitert. Im Stadium der Ruhe regenerieren sich die Sekretgranula, die Zelle wird wieder größer, der Kern rückt basalwärts. In ein und demselben Acinus trifft man die einzelnen Zellen in verschiedenen Sekretionsphasen an.



Fig. 9. Infraorbitalis des Kaninchens (seröse Drüse). Sekretgefüllte Zellen (linke Figur) und Zellen während der Sekretabgabe (rechte Figur). Nach Langley. Aus Ellenberger (Handbuch der vergleichenden mikroskopischen Anatomie).

Auch am Epithel der Speichelröhren sind sekretorische Veränderungen beschrieben worden.

2c) Blutgefäße und Nerven. Die Arterien verlaufen zumeist mit den Ausführungsgängen und gehen in Kapillaren über, welche sowohl die Speichelröhren als auch die Alveolen umspinnen. Von hier gelangen die Blutbestandteile durch Vermittlung von Lymphspalten an die Drüsenzellen. Innerhalb der einzelnen Drüsenläppchen bewegt sich die Gewebslymphe ausschließlich in solchen Bindegewebsspalten, während Lymphgefäße mit eigenen Wandungen sich nur zwischen den Läppchen befinden.

Die in der Drüse sich verzweigenden Nerven sind cerebralen und sympathischen Ursprungs. Teils markhaltig, teils marklos verlaufen sie, stellenweise mit Anhäufungen von Ganglienzellen versehen, zum Teil an die Speichelröhren und Alveolen. An den letzteren bilden sie der Membrana propria anliegende Geflechte, von denen aus Fäserchen bis an die Drüsenzellen herangehen. Zum anderen Teile verlaufen sie an die Wandungen der Blutgefäße.

3. Vergleichende Anatomie und Physiologie. In der Wirbeltierreihe findet man Speicheldrüsen nur da gut ausgebildet, wo das Tier in erster Linie zum Erfassen, beim Schlucken und Kauen der Nahrung Speichel nötig hat. Den Fischen zunächst, als in Wasser lebenden Tieren, fehlen die großen Drüsen gänzlich, und es kommen bei ihnen

nur einzellige Schleimdrüsen in der Mundhöhle vor. Bei den Amphibien findet sich schon eine Zwischenkieferdrüse, bei den Anuren auch eine Rachendrüse. Der Speichel wird von den Fröschen zum Fangen der Nahrung verwendet. Die auf dem Lande lebenden Reptilien besitzen noch eine Unterzungendrüse, hier finden sich zum erstenmal seröse Anteile, während bis dahin nur Schleimdrüsen vorlagen. Außerhalb der Mundhöhle gelegene Drüsen haben erst die Vögel, und zwar am reichlichsten die körner- und insektenfressenden. Der Speichel hat hier zum Teil eine eigenartige Bedeutung. So verwenden ihn die Segler zum Kleben beim Bau des Nestes. Die Säuger haben die geschilderten kleinen und großen Drüsen. Je nach der Zusammensetzung der Nahrung unterscheiden sich aber im allgemeinen die einzelnen Drüsen in ihrer Massenentwickelung und auch hinsichtlich ihres Gehalts an Eiweiß- und Schleimzellen. Je trockener die Kost ist, um so mehr Speichel erfordert sie, und deshalb sind in solchen Fällen die serösen Speicheldrüsen mächtiger entwickelt. Durch eine verhältnismäßig sehr große Parotis sind Pferd, Rind und Schwein ausgezeichnet, verhältnismäßig klein ist sie bei Hund und Katze.

Es gibt auch unter den Wirbellosen einige, bei denen man von Speichel und Speicheldrüsen reden kann, da sie ein Sekret produzieren, welches bei der Nahrungsaufnahme und auch manchmal zur Verdauung der Nahrung benutzt wird. Bei den Spinnen ist der nach außen entleerte Speichel imstande, die verdaulichen Teile einer erbeuteten Fliege im Laufe einiger Stunden zu verflüssigen (Bertkau, zitiert nach Biedermann). Die Insekten besitzen mehrere Drüsenpaare in Kopf und Brust, sie sind bei Hymenopteren am reichlichsten entwickelt, während sie den Käfern fast ganz fehlen. In den Drüsen von Blatta sind an den zentral gelegenen Zellen der Drüsenräume im Prinzip ganz ähnliche Sekretionszustände beschrieben worden, wie bei den höheren Tieren. Beim Hungern nämlich sind die Zellen mit Sekrettropfen angefüllt. Diese werden bei der Tätigkeit verflüssigt und aus der Zelle entleert. Das Drüsensekret ist diastatisch wirksam. Auch bei den Cephalopoden spricht man von Speicheldrüsen. Die von R. Krause genauer untersuchten hinteren Speicheldrüsen von Octopus gaben ein schwach alkalisches, eiweißreiches Sekret, das für Taschenkrebse tödlich ist. Es handelt sich hier also um Giftdrüsen. Hingegen ist bei Landpulmonaten (Helix pomatia) das Sekret der Speicheldrüsen wahrscheinlich von mechanischer Wirkung auf den im Mund befindlichen Bissen, indem es ihn feucht macht und mit Schleim überzieht.

4. Die Vorgänge bei der Absonderung. In letzter Linie stammen alle Bestandteile des Speichels aus dem Blut. Sie werden durch die Lymphe den absondernden Zellen zugeführt und von diesen in die abführenden Gänge entleert. Aber der Vorgang der Absonderung, selbst die Absonderung des Wassers, ist kein einfacher Filtrationsprozeß seitens des Blutdrucks. Vielmehr greift die Drüse dabei aktiv ein, indem sie an dem Stoffwechsel Teil hat und Energie liefert. Dies geht schon aus der älteren Beobachtung C. Ludwigs hervor, daß die Sekretion noch kurze Zeit fortdauern kann, nachdem die Blutzufuhr zur Drüse abgeschnitten ist. Ferner fand Ludwig, daß der Druck im Speichelgang höher sein kann als der Blutdruck in der Carotis.

Zum gleichen Ergebnis kommt man, wenn man Speichel und Blut hinsichtlich ihrer Zusammensetzung vergleicht. Nicht alle Bestandteile des Speichels nämlich sind im Blut vorgebildet, gerade die spezifischen Körper, wie Fermente und Mucin, werden erst in der Drüse selbst gebildet. Dies geschieht in den Zellen durch die Tätigkeit des Protoplasmas.

Was zunächst das Mengenverhältnis der Salze im Blut und Speichel betrifft, so ist der Salzgehalt des Speichels geringer als der des Blutes. Infolgedessen ist auch sein osmotischer Druck niedriger (Δ = 0,090 bis 0,240 im menschlichen Speichel). Der Kochsalzgehalt des Speichels zwar richtet sich innerhalb gewisser Grenzen nach dem des Blutes, dies findet jedoch bei den Phosphaten, Carbonaten und Sulfaten nach Asher (Biochem. Zeitschr., Bd. 14, 1908) nicht statt. Der Traubenzucker des Blutes ferner passiert normalerweise die Drüse überhaupt nicht und geht nach Asher auch dann nicht in den Speichel über, wenn sein Gehalt im Blut durch intravenöse Injektion erheblich gesteigert wird.

Bezüglich des Ortes, an dem die aus dem Blut direkt sezernierten Stoffe in der Drüse ausgeschieden werden, nimmt man als sicher an, daß sie die Drüsenzellen passieren, aber zum Teil wohl auch durch die Zellen der Ausführungsgänge, speziell der „Speichelröhren" gehen.

Das Mucin der Schleimspeicheldrüsen hingegen und das Ptyalin stammen sicherlich nur aus den Drüsenepithelien, und die oben beschriebenen morphologischen Aenderungen dieser Zellen stehen in innigster Beziehung zur Bildung und Absonderung dieser Produkte. Demnach wird in den Sekretionspausen das Mucin in Form der Granula im Protoplasma angehäuft; das gleiche gilt für das Ferment. Beide Stoffe sind Elaborate des Protoplasmas. Es ist jedoch möglich, daß dabei der Kern in irgendeiner Weise mitwirkt. Bei forcierter Tätigkeit verliert die Zelle allmählich die Granula. Dieser Vorgang dürfte hier so ablaufen, daß die Granula nicht als solche ausgestoßen

werden, sondern zunächst verflüssigt werden, und dann die Zelle verlassen. Die Kräfte für die Austreibung des Sekrets in die Gänge werden zum Teil von der Zelle selbst geliefert, es ist aber möglich, daß außerdem die Korbzellen der Acini dabei mitwirken.

Wie zu erwarten ist, spielen sich intensive Stoffwechselvorgänge in der Drüse ab, sowohl bei der Bildung der spezifischen Produkte, als auch während des eigentlichen Absonderungsvorganges. Als allgemeinen Ausdruck dieses Stoffwechsels muß man die Produktion von Wärme betrachten, welche in der tätigen Drüse nachgewiesen ist. C. Ludwig fand den bei Chordareizung abgesonderten Speichel bis um $1\frac{1}{2}^0$ wärmer als das Carotisblut, und das Venenblut wärmer als in der ruhenden Drüse. Ferner zeugt die außerordentlich gesteigerte Blutzirkulation der tätigen Drüse von der vermehrten Arbeit. Das Blut zirkuliert schneller, der Lymphabfluß ist vermehrt. In neuerer Zeit von Barcroft ausgeführte Bestimmungen des Sauerstoff- und Kohlensäuregehalts des arteriellen und venösen Drüsenblutes ergaben, daß in der gereizten Drüse der Gaswechsel etwa dreimal so groß als in der ruhenden ist. Schließlich läßt sich, besonders an stark tätigen Drüsen, am Galvanometer ein Strom nachweisen, wenn man vom Hilus und der Drüsenoberfläche ableitet. Die Oberfläche verhält sich dabei (während Chordareizung) negativ zum Hilus.

Untersuchungen über die Stoffwechselvorgänge im einzelnen sind bis jetzt nur in geringer Ausdehnung angestellt worden. So hat sich in der tätigen Drüse eine Verringerung des Gesamtstickstoffgehalts bis um 26% ergeben (zitiert nach Pawlow, Nagels Handbuch II, 2. Hälfte). Sehr bemerkenswert ferner ist der Befund von Asher und Karaulow (Biochem. Zeitschr., Bd. 25, 1910), daß sich im venösen Blut während der Absonderung mehr Zucker als im arteriellen, und in der Ruhe etwas weniger als im arteriellen findet. Die genannten Autoren sind der Meinung, daß die Drüsenzellen während der Tätigkeit beträchtliche Zuckermengen frei machen, wovon ein Teil in das Venenblut geht, und daß die Zellen in der Ruhe ihren Zuckerbestand aus dem Blut wieder regenerieren.

5. Verhalten der Blutgefäße. Wenn auch die Speichelabsonderung in weiten Grenzen von der Blutzirkulation unabhängig ist, so ist die Blutversorgung der Drüse auf die Dauer doch unerläßlich, erstens, damit immer neues Absonderungsmaterial den Zellen zugeführt wird, und ferner, weil die Zellen bei ihrer Arbeit das Blut zur eigenen Ernährung nötig haben.

Die Blutmenge, welche die Drüse durchströmt, ist regulierbar durch einen nervösen Mechanismus, der an den Blutgefäßen angreift. Zu der Drüse gehen nämlich zwei Arten von Gefäßnerven, gefäßerweiternde und gefäßverengernde. Die ersteren stammen von Gehirnnerven. Die zur Parotis gehenden Fasern verlaufen im Nervus auriculotemporalis, diejenigen der Submaxillaris und Sublingualis in der Chorda tympani. Die verengernden Fasern erreichen die Drüsen im Sympathikus. Durch Reizung des peripheren Endes eines durchschnittenen cerebralen Nerven wird infolge der Gefäßerweiterung die Strömungsgeschwindigkeit des Blutes und der Blutdruck in der Drüse erhöht, durch Reizung des Sympathicus hingegen die Strömung verlangsamt und der Blutdruck herabgesetzt. Messungen der Stromgeschwindigkeit wurden im Venengebiet der Submaxillaris bei Chordareizung von Burton-Opitz ausgeführt und ergaben eine Zunahme auf das fünf- bis sechsfache. Aehnliche Werte erhielten Moussu und Tissot im Venenblut der Parotis der Kuh.

Nach den Untersuchungen von Henderson und Löwi (Arch. f. exper. Pathol. u. Pharmakol., Bd. 53, 1905, S. 56) kommt die Gefäßerweiterung bei Chordareizung, gemessen an der Ausflußgeschwindigkeit des Venenblutes, auch dann zustande, wenn man die ganze Drüse eingipst und dadurch eine Zunahme ihres Volumens unmöglich macht.

Das Pilocarpin besitzt ebenfalls gefäßerweiternde Wirkung. Diese soll aber nach Henderson und Löwi (Arch. f. exper. Pathol. u. Pharmak., Bd. 53, 1905, S. 62) nicht durch Erregung der Chordaenden in den Gefäßen kommen, da Atropin, welches erwiesenermaßen nicht auf die Gefäße wirkt, den Erfolg des Pilocarpins aufhebt.

6. Innervation der Speicheldrüsen. Die Speichelsekretion erfolgt normalerweise unter Vermittlung von Nerven.

Das gemeinsame Zentrum für die drei großen Drüsenpaare befindet sich im verlängerten Mark am Boden der 4. Gehirnkammer in der Nähe der Fazialiskerne. Durch Reizung dieser Stelle erhält man Speichel aus allen Drüsen. Das Zentrum kann unter gewöhnlichen Verhältnissen durch Bahnen, welche von der Hirnrinde kommen und nach Edinger (Bau der nervösen Zentralorgane, Bd. I, 1911) wahrscheinlich den Thalamus passieren, in Erregung versetzt werden. Dann handelt es sich um psychische Vorgänge im gewöhnlichen Sinne. Auf dem Wege eines reinen Reflexes dagegen treffen Erregungen meist von der Mundschleimhaut her das Zentrum. Dies geschieht durch Vermittlung des Geschmacksnerven (Nervus glossopharyngeus)

und des sensiblen Nervus lingualis. Auch durch künstliche Reizung anderer sensibler Nerven (Vagus u. a.) kann beim Tier der Speichelreflex ausgelöst werden.

In den Nervenzellen, die in der Drüse selbst liegen, hat man eine Art peripherer Zentralorgane zu sehen, die allerdings für gewöhnlich keine Selbständigkeit besitzen.

Was die zentrifugalen Nerven betrifft, so kann jede Drüse durch Reizung ihres cerebralen Nerven und des Sympathikus zur Sekretion gebracht werden.

Der cerebrale Sekretionsnerv der Parotis ist der Nervus auriculotemporalis, der vom Ganglion oticum kommend durch den Nervus petrosus superficialis minor seine sekretorischen Fasern erhält. Derjenige für die Mandibulardrüsen ist die Chorda tympani, deren sekretorische Fasern vom Fazialis kommen und eine kurze Strecke im Nervus lingualis verlaufen. Die sympathischen Fasern treten durch das obere Halsganglion in den Halssympathikus. Es sind somit dieselben Nervenstämme, welche auch die Fasern für die Blutgefäße der Drüse führen.

Reizt man nun einen cerebralen Nerven oder den Sympathikus und beobachtet dabei die Speichelabsonderung, so bekommt man ganz verschiedenen Speichel. Ersterenfalls erhält man in größerer Menge eine wässerige klare Flüssigkeit (cerebraler Speichel), anderenfalls dicklichen Speichel, der reicher an organischen Bestandteilen ist und äußerst spärlich abgesondert wird (Sympathikusspeichel); am günstigsten ist es, wenn man zwischen die einzelnen Sympathikusreizungen Pausen einschaltet. Eine Ausnahme macht die Submaxillaris der Katze, insofern bei ihr Sympathikusreizung gerade umgekehrt den dünnen Speichel liefert.

Bei diesen Reizungen handelt es sich zweifellos um die Wirkung eigener sekretorischer Nervenfasern, welche die Drüsenzellen direkt innervieren, und nicht um eine Folge der gleichzeitigen Gefäßreizung. Denn die Unabhängigkeit der Drüsensekretion von der Blutzirkulation ist erwiesen. Ferner ist der histologische Zusammenhang der Nervenfasern mit den Drüsenzellen nachgewiesen. Es ist nur die Frage, ob wirklich eine Doppelinnervation der Drüsenzellen durch zwei Arten von Nervenfasern vorhanden ist. Es könnte ja nur eine Faserart existieren, und der Unterschied der beiden Speichelsorten von der verschiedenen Blutzirkulation herrühren. Tatsächlich ist eine derartige Ansicht geäußert worden (Langley). Zurzeit aber folgen die meisten Autoren der ursprünglichen, von R. Heidenhain begründeten Anschauung, daß es wirklich zwei verschiedene sekretorische Faserarten gibt. Die eine findet sich nach ihm vorwiegend im cerebralen Nerven und bewirkt die Absonderung von Wasser und Salzen, die andere vorwiegend im Sympathikus und hat die Aufgabe, die organischen Bestandteile aus den Zellen abzusondern. Mit dieser Annahme einer gegensätzlichen Wirkungsweise zweier Faserarten stimmt auch das galvanische Verhalten der Drüse überein. Denn der von der tätigen Submaxillaris gelieferte Strom ist bei Sympathikusreizung dem bei Chordareizung gelieferten entgegengesetzt gerichtet.

Von Giften wirken Pilocarpin, Physostigmin und Muscarin erregend auf die Enden der cerebralen Nervenfasern der Drüsenzellen. Atropin dagegen hemmt dieselben, ohne aber gleichzeitig die Nervenenden in den Blutgefäßen zu beeinflussen.

Eine eigentümliche Erscheinung ist die, daß 1 bis 3 Tage nach Durchtrennung des cerebralen Nerven die Drüse wieder anfängt zu sezernieren („paralytische“ Sekretion). Dieser Zustand kann wochenlang anhalten. Dann aber atrophiert die Drüse. Ob es sich, wie Langley meint, hierbei um eine Erregung der in der Drüse selbst gelegenen Nervenzellen handelt oder ob andere Umstände mitwirken, ist noch nicht entschieden.

7. Sekretionsreize. Abgesehen von einer geringfügigen immerwährenden Speichelabsonderung, durch welche die Mundhöhle andauernd angefeuchtet wird, findet die Sekretion in Zwischenräumen statt, derart, daß in einem Akt gewöhnlich größere, ja sogar enorme Speichelmengen geliefert werden. Die gewöhnliche Art, auf welche in dieser Weise der Speichel abgesondert wird, ist der einfache Reflex von der Mundhöhle aus. Die reizaufnehmenden Apparate sind dabei die Endigungen des Lingualis und Glossopharyngeus, der Reiz wird durch die Ingesta gegeben. Aber nicht jeder beliebige Reiz ruft Speichelfluß hervor. Es ist das Verdienst des russischen Physiologen Pawlow und seiner Schüler, durch systematische Versuche zuerst festgestellt zu haben, daß die Substanzen je nach ihrer Menge und ihrer physikalischen und chemischen Beschaffenheit Speichel von verschiedener Quantität und Zusammensetzung produzieren. Die verschiedenen Reize haben also eine spezifische Wirkung, und es haben demgemäß schon die reizaufnehmenden Nervenapparate eine spezifische Erregbarkeit.

Pawlow fand am Hund folgendes. Während Kieselsteine, ins Maul geworfen, unwirksam sind, ruft Sand starken Speichelfluß hervor. Säuren, Salze, bittere und ätzende Substanzen bewirken starken Speichelfluß, Eiswasser und Schnee dagegen sind ohne Erfolg. In diesen Fällen ist der Speichel dünnflüssig und enthält nur wenig Mucin. Die Reizstoffe sind also nur dann wirksam, wenn sie, wie z. B. der Sand, durch den Speichel aus dem Maul herausgespült werden können, was bei den schweren Steinen nicht möglich

wäre, oder wenn sie wie die Säure verdünnt und abgestumpft, also unschädlich gemacht werden sollen. Man kann mit Pawlow hierin eine äußerst zweckmäßige Einrichtung erblicken, eine Auffassung, welcher sich allerdings Popielski (Pflügers Archiv, Bd. 127, 1909) nicht anschließt. Bei eßbaren Substanzen ist vor allem ihre physikalische Beschaffenheit von Bedeutung. Je trockener und rauher nämlich die Nahrung ist, um so mehr Speichel ergießt sich. Nach Beobachtungen in Ellenbergers Laboratorium sondert ein Pferd nach Darreichung von Heu oder Stroh etwa sechsmal so viel Speichel ab als auf Gras. In gleicher Weise wirken trockenes Fleischpulver und frisches Fleisch beim Hund verschieden. Der hierbei abgesonderte Speichel ist stets mucinreich. Wie diese Beispiele zeigen, findet auch eine zweckmäßige Anpassung an eßbare Stoffe statt. Denn trockene Nahrung erfordert außer dicklicherem Speichel vor allem viel Flüssigkeit, um geschluckt zu werden.

Aus der folgenden Tabelle sind die Schwankungen der Speichelmenge ersichtlich, welche in demselben Zeitabschnitt auf verschiedene Substanzen ergossen wird (nach Sellheim; aus Pawlow, Nagels Handbuch, Bd. 2, 2. Hälfte, S. 671):

In die Mundhöhle eingeführte Substanz	Menge des Speichels in ccm	
	aus Submaxillar- u. Sublingualdrüse	aus der Ohrspeicheldrüse
Weißbrot	2,2	1,0
Weißbrotsemmel	3,0	1,6
Milch	2,4	0,5
Rohes Fleisch	1,1	0,5
Fleischpulver	4,4	1,9
Lösung (1%) von Extr. Quassiae	1,9	0,7
Formalinlösung (0,5%)	2,8	1,0
Saccharinlösung 10%)	2,8	1,3
Kochsalzlösung (20%)	4,0	2,0
Senfölemulsion (ein Tropfen auf 100 ccm Wasser)	4,5	2,1
Salzsäurelösung (0,5%)	4,3	2,0
Schwefelsäurelösung (0,671%)	4,3	2,2
Glyzerin	4,0	2,0
Sand	1,9	0,8

Pawlow und seine Schüler haben weiterhin gefunden, daß auch dann Speichel fließt, wenn das Reizmittel nicht direkt in das Maul des Hundes kommt, sondern dem Tier nur vorgehalten wird. So ruft schon allein der Anblick z. B. von Brot den charakteristischen Speichel hervor. Hier ist also das Sinnesorgan der reizaufnehmende Apparat (psychische Reizung). Ja es kann sogar, wie jeder aus eigener Erfahrung weiß, schon das bloße Denken an bestimmte Speisen Speichelfluß bewirken.

In weiterer Verfolgung dieser Vorgänge, welche in letzter Linie auf einer äußerst fein abgestuften Tätigkeit des Nervensystems beruhen, hat Pawlow gefunden, daß man sogar einen beliebigen indifferenten Reiz, z. B. einen optischen oder akustischen, zu einem Speichelreiz machen kann, wenn man ihn zunächst eine Zeitlang mit einem wirksamen Speichelreiz kombiniert (bedingter Reflex). Ein Ton wird zunächst gleichzeitig mit dem dargereichten Futter angegeben. Schließlich ruft der Ton allein schon die Sekretion hervor. Den gleichen Effekt erzielte Boldireff auf Geruchs- und Kältereize der Haut hin.

Man weiß endlich, daß auch die Kaubewegungen die Speichelabsonderung fördern. Bei einseitigem Kauen fließt auf der Kauseite mehr Speichel, was sich besonders gut bei Wiederkäuern feststellen ließ.

8. Der Speichel. 8a) Zusammensetzung und Menge. Läßt man aus dem geöffneten leeren Mund Speichel in ein Gefäß ausfließen, so erhält man gemischten Mundspeichel, das ist eine Mischung der Sekrete aller Speicheldrüsen. Er enthält an morphologischen Beimengungen aus der Mundhöhle Schleimhautepithelien, Speichelkörperchen (aus den Zungenbälgen stammende Leukocyten), Mikroorganismen und auch Nahrungsreste. Der Speichel ist farb- und geruchlos, infolge seines Mucingehaltes fadenziehend und schäumt leicht. Beim Stehen trübt er sich infolge Abscheidung von kohlensaurem Kalk. Seine Reaktion ist gegen Lackmus alkalisch, auf kohlensäureempfindliche Indikatoren aber (Phenolphtalein) neutral oder schwach sauer. Das spezifische Gewicht beträgt 1,002 bis 1,009.

An anorganischen Bestandteilen enthält er Na-, K-, Ca- und Mg-Salze der Chlorwasserstoffsäure, Phosphorsäure, Kohlensäure und auch Schwefelsäure. Ferner findet sich Rhodanalkali stets beim Menschen; bei Pferd, Rind, Schaf, Ziege und Schwein fehlt es nach Ellenberger und Hofmeister. Das Rhodan läßt sich mit Eisenchloridlösung nachweisen (Rotfärbung, die nach Salzsäurezusatz bleibt). Die Angaben über seine Menge beim Menschen schwanken zwischen 0,003 und 0,167 : 1000; die Tageszeit ist von Einfluß, zunehmende Speichelabsonderung verringert seine Menge.

Von organischen Stoffen ist besonders das Mucin hervorzuheben, weil es dem Speichel seine charakteristische zähe Beschaffenheit verleiht. Es gehört zu den zusammengesetzten Eiweißkörpern und enthält außer Eiweiß einen Kohlehydratkomplex.

Ferner findet sich im Speichel ein diastatisches Ferment (Ptyalin), Maltose und eine Oxydase, welche Guajaktinktur bläut.

Aus welchen Drüsen die einzelnen Bestandteile stammen, erfährt man, wenn man nach Einführen von Kanülen in die Drüsenausführungsgänge die einzelnen Drüsensekrete gesondert auffängt. Dies ist bei Mensch und Tier möglich. Zur dauernden Gewinnung reinen Drüsensaftes vom Tier kann man nach Pawlows Vorgang das Ende des Ausführungsganges mit der umliegenden Schleimhaut in die Hautwunde einheilen und so das Sekret nach außen ableiten. Man findet dann in Uebereinstimmung mit den histologischen Befunden, daß das Parotissekret kein Mucin hat, aber relativ reich an anderem Eiweiß ist. Das Mandibulardrüsensekret dagegen ist mucinreich. Das diastatische Ferment, welches übrigens den reinen Carnivoren fehlt, wird beim Menschen von allen drei Drüsen geliefert, ebenso findet man das Rhodankali, soweit es vorkommt, in allen Sekretarten, vorwiegend aber in dem der Parotis.

An Gasen sind Sauerstoff, Stickstoff und auch direkt auspumpbare Kohlensäure gefunden worden.

Die quantitative Zusammensetzung des Speichels schwankt sehr je nach den Umständen, unter denen die Drüsen arbeiten. Vor allem richtet sich der Wasser- und Mucingehalt nach der Beschaffenheit des Futters (vgl. S. 203). Bezüglich des Salzgehaltes gilt als Regel, daß mit zunehmender Absonderungsgeschwindigkeit der Salzgehalt steigt; die organischen Stoffe nehmen hierbei eine Zeitlang auch zu, später aber infolge Ermüdung der Drüse nicht mehr (R. Heidenhain). Auch unabhängig von der Nahrungsaufnahme sollen Schwankungen in der quantitativen Zusammensetzung des Speichels, vornehmlich im Salzgehalt, vorkommen. Für den menschlichen Speichel kann man etwa in 1000 Teilen 988,3 bis 995,16 Teile Wasser, 4,84 bis 11,7 feste Bestandteile, darunter 1,3 bis 2,2 Salze, annehmen (Hammarsten, Lehrbuch). Demnach ist der Speichel eine sehr salzarme Flüssigkeit.

Auch die Speichelmenge wird von der Art und Stärke des Reizes außerordentlich beeinflußt. Sehr verschiedene Zahlen ergeben sich natürlich bei den einzelnen Tierarten, da ja das Futter verschieden ist. Ganz ungeheuere Speichelmengen werden nach den in Ellenbergers Institut ausgeführten Bestimmungen von großen Tieren geliefert. In 24 Stunden können große Pflanzenfresser 40 000 bis 60 000 g liefern. Scheunert und Gottschalk bekamen in 60 Minuten aus einer Parotis des Pferdes über 1700 g. Für den Menschen schätzt man die 24stündige Gesamtmenge auf 1000 g und mehr. Tabakkauen erhöht die Menge.

8b) Speichelverdauung. Die Speicheldiastase (Ptyalin) baut die Stärke der Nahrung ab. Hierbei entstehen verschiedene Dextrine, welche sich durch ihre Färbbarkeit mit Jod voneinander unterscheiden, und Zucker. Zuerst bildet sich sogenannte lösliche Stärke (Amylodextrin, mit Jod blau), aus dieser zunächst Erythrodextrin (mit Jod rot) und dann verschiedene Achroodextrine, welche sich mit Jod nicht färben. Der Zucker, welcher außer den Dextrinen entsteht, ist Maltose und Isomaltose. Die Maltose wird vom Ptyalin selbst nicht weiter verändert. Es findet sich aber im Speichel noch eine Maltase und diese führt sie in Traubenzucker über. Das amylolytische Vermögen des Speichels unterliegt Tagesschwankungen und ist nach Fricker (Archiv für Verdauungskrankheiten **21**, 1910) beim nüchternen Menschen gewöhnlich morgens herabgesetzt, steigt gegen Mittag und sinkt abends wieder.

Zu einer vollständigen Verdauung der Stärke kommt es beim Menschen in der Mundhöhle nicht, weil die Speisen zu kurze Zeit darin bleiben; längere Zeit dauert das Kauen nur beim Pflanzenfresser. Immerhin ist die Wirkung des Ptyalins so rasch, daß schon während des Kauens Zucker nachweisbar ist. Der mit dem Bissen verschluckte Speichel kann aber im Magen noch wirken. Wenn nämlich auch die Salzsäure des Magensaftes in Konzentrationen von über 0,003 bis 0,005 % hemmend wirkt, so ist sie in starker Verdünnung doch durchaus günstig für die Ptyalinwirkung. Und es ist zu berücksichtigen, daß bei reichlicher Nahrungsaufnahme der Magensaft, also auch die Salzsäure, infolge der eigentümlichen Schichtungsverhältnisse des Mageninhalts nur langsam an die später genossenen Anteile herankommt. So könnte also doch eine Zeitlang die Stärkeverdauung im Magen noch fortgeführt werden.

Literatur. ***E. Abderhalden,*** *Lehrbuch der physiologischen Chemie. Berlin und Wien 1909.* — ***J. Barcroft,*** *Zur Lehre vom Blutgaswechel in den verschiedenen Organen. Ergebn. d. Physiol., Bd.* **7**. *Wiesbaden 1908.* — ***W. Biedermann,*** *Verdauung. Wintersteins Hdb. d. vergleichenden Physiologie, Jena.* — ***O. Cohnheim,*** *Physiologie der Verdauung und Ernährung. Berlin und Wien 1908.* — ***Derselbe,*** *Die Physiologie der Verdauung und Aufsaugung. Nagels Hdb. der Physiologie, Bd.* **2**, *2. Braunschweig 1907.* — ***V. v. Ebner,*** *Köllikers Handbuch der Gewebelehre, Bd.* **3**, *1. Leipzig 1899.* — ***W. Ellenberger,*** *Handbuch der vergleichenden mikroskopischen Anatomie, Bd.* **3**. *Berlin 1911.* — ***W. Ellenberger und A. Scheunert,*** *Lehrbuch der vergleichenden Physiologie der Haussäugetiere. Berlin 1910.* — ***O. Hammarsten,*** *Lehrbuch der physiologischen Chemie. Wiesbaden 1911.* — ***R. Heidenhain,*** *Die Absonderungsvor-*

gänge. Hermanns Hdb. d. Physiol., Bd. **5**, *1. Leipzig 1883.* — **R. Höber,** *Physikalische Chemie der Zelle und der Gewebe. Leipzig 1911.* — **E. S. London,** *Mundverdauung und Magenverdauung. Oppenheimers Hdb. d. Biochemie, Bd.* **3**, *1. Jena 1909.* — **R. Metzner,** *Die histologischen Veränderungen der Drüsen bei ihrer Tätigkeit. Nagels Hdb. d. Physiol., Bd.* **2**, *2. Braunschweig 1907.* — **H. H. Meyer und R. Gottlieb,** *Experimentelle Pharmakologie. Berlin und Wien 1911.* — **A. Noll,** *Die Sekretion der Drüsenzelle. Ergebn. d. Physiol., Bd.* **4**. *Wiesbaden 1905.* — **A. Oppel,** *Lehrb. d. vergl. mikrosk. Anat., Bd.* **3**. *Jena 1900.* — **E. Overton,** *Ueber den Mechanismus der Resorption und der Sekretion. Nagels Hdb. d. Physiol., Bd.* **2**. *2. Braunschweig 1907.* — **J. P. Pawlow,** *Die Arbeit der Verdauungsdrüsen. Wiesbaden 1898.* — **Derselbe,** *Das Experiment als zeitgemäße und einheitliche Methode medizinischer Forschung. Wiesbaden 1900.* — **Derselbe,** *Die äußere Arbeit der Verdauungsdrüsen und ihr Mechanismus. Nagels Hdb. d. Physiol., Bd.* **2**, *2. Braunschweig 1907.* — **Derselbe,** *Psychische Erregung der Speicheldrüsen. Ergebn. d. Physiol., Bd.* **3**, *1. Wiesbaden 1904.* — **Derselbe,** *Naturwissenschaft und Gehirn. Ergebn. der Physiol., Bd.* **11**. *Wiesbaden 1911.* — **Derselbe,** *Ein neues Laboratorium zur Erforschung der bedingten Reflexe. Ergebn. d. Physiol., Bd.* **11**. *Wiesbaden 1911.* — **F. N. Schulz,** *Speicheldrüsen und Speichel. Oppenheimers Hdb. d. Biochemie, Bd.* **3**, *1. Jena 1909.*

A. Noll.

Spektralanalyse.

Qualitative Spektralanalyse.

Vorbemerkung. 1. Einleitung. 2. Konstanz und Veränderlichkeit der Spektra. 3. Emission und Absorption. 4. Verschiedene Methoden der qualitativen Analyse. 5. Empfindlichkeit des Verfahrens. 6. Emission: a) Bogen. b) Funken. c) Flammen. d) Geißlerröhren. e) Lumineszenzerscheinungen. 7. Zur speziellen Analyse. 8. Absorption: a) Feste Körper. b) Lösungen. α) Organische Körper. β) Anorganische Körper. c) Gase. 9. Analyse von Gemischen.

Vorbemerkung.

Für die spektroskopischen Grundlagen der Spektralanalyse vergleiche man den Artikel „Spektroskopie".

1. Einleitung. Die qualitative Spektralanalyse verfolgt zwei verschiedene Zwecke. Sie will entweder aus dem Spektrum eines Körpers die Anwesenheit einer bestimmten Substanz feststellen oder aus der Zusammensetzung des Spektrums auf die Bestandteile des untersuchten Körpers schließen. Dabei hat die positive Reaktion im Spektrum größere Bedeutung als die negative. Geht man einen Schritt weiter und verlangt die prozentuale Zusammensetzung des untersuchten Körpers zu wissen oder will man feststellen, wieviel von einer gegebenen Substanz in einer gegebenen Menge von Untersuchungsmaterial gegenwärtig ist, so gelangt man zur quantitativen Spektralanalyse. Man vergleiche darüber den folgenden Artikel.

2. Konstanz und Veränderlichkeit der Spektra. Die Möglichkeit einer Spektralanalyse beruht auf der relativen Unveränderlichkeit der Spektra. Man vergleiche hierüber den Abschnitt 8 des Artikels „Spektroskopie". Hier sei nur erwähnt, daß die Spektra der festen, flüssigen und gasförmigen Körper insofern charakteristisch für die betreffenden Elemente oder Verbindungen sind, als unter gleichen Umständen stets das gleiche Spektrum erscheint und keine zweite Substanz ein Spektrum besitzt, das dem Spektrum eines Körpers von anderer chemischer Zusammensetzung genau gleich wäre. Man kann auch umgekehrt sagen, daß jeder Veränderung eines Spektrums eine Veränderung in der chemischen Beschaffenheit des untersuchten Körpers entspricht, wenigstens für die Verbindungen. Diese Aussagen bedürfen jedoch in doppelter Hinsicht der Einschränkung. Zunächst sind nicht alle Spektra in gleichem Maße charakteristisch. Feste Körper besitzen nur in seltenen Fällen Emissions- oder Absorptionsspektra, die ohne weiteres nach ihrer Zugehörigkeit erkannt werden können. Es bedarf dazu einer feineren Untersuchung, einer quantitativen Bestimmung des Intensitätsverlaufes der Absorption oder Emission im ganzen Spektrum. Dasselbe trifft für die Flüssigkeiten zu. In der Regel muß eine Substanz in Gasform übergeführt werden, damit man allein aus dem Bau oder der Zusammensetzung ihres Spektrums analytische Schlüsse ziehen kann. Mit anderen Worten läßt sich das gleiche aussprechen, indem man sagt, daß sich in erster Linie die Linien- oder Bandenspektra zur qualitativen Analyse eignen, in zweiter Linie die Streifenspektra, in dritter die kontinuierlichen Spektra (vgl. den Artikel „Spektroskopie" 7). Die zweite Einschränkung wird dadurch herbeigeführt, daß die meisten Elemente mehrfache Spektra besitzen, und daß die Zusammensetzung dieser mit den Bedingungen der Untersuchung veränderlich ist; außerdem ist es nicht möglich, alle Körper unter solchen Bedingungen zu untersuchen, daß sie charakteristische Spektra geben (z. B. farblose Lösungen); endlich fehlt es an einem spektroskopischen Kriterium, mittels dessen man zwischen dem Spektrum eines Elementes und demjenigen einer Verbindung unterscheiden könnte. Man kann nur sagen, daß ein Linienspektrum stets einem Element angehört. Erst recht ist es unmöglich, das Spektrum einer Verbindung aus den

Eigenschaften ihrer Bestandteile und ihrer Konstitution vorherzusagen.

3. Emission und Absorption. Emission und Absorption können in gleicher Weise zur qualitativen Analyse benutzt werden. Im ersten Falle muß die zu untersuchende Substanz zum Leuchten gebracht werden. Dazu kann man sie im Bogen, im Funken, in Flammen, in Geißlerröhren, in erhitzten Gefäßen oder unter dem Einfluß lumineszenzerregender Mittel (wie Kathodenstrahlen, Kanalstrahlen, ultraviolettes oder sichtbares Licht) untersuchen. In Absorption erfolgt die Spektralanalyse entweder durch Untersuchung des reflektierten oder des durchgehenden Lichtes. Dabei kann man sich entweder darauf beschränken, das gesamte durchgehende, reflektierte oder emittierte Licht zu prüfen (Kolorimetrie, vgl. den folgenden Artikel „Quantitative Spektralanalyse"), oder man zerlegt das zu untersuchende Licht in ein Spektrum. Das letztere Verfahren ist das allgemeinere und genauere. Es soll hier allein berücksichtigt werden. Dabei sei für die zu benutzenden Apparate auf die Artikel „Spektroskopie", „Absorption", „Photometrie", „Optische Instrumente" verwiesen. Um das erhaltene Spektrum zu kennzeichnen, kann man wiederum verschiedene Wege einschlagen. Handelt es sich um Linien- oder Bandenspektra, so gibt die Wellenlänge der Linien und Kanten, ergänzt durch angenäherte Intensitätsschätzungen die sicherste Beschreibung (vgl. den Artikel „Spektroskopie" 3). Da der Platz der Linien und Banden in dem von bestimmten Apparaten gelieferten Spektrum durch die Wellenlänge bestimmt ist, so genügt in vielen Fällen statt einer Wellenlängenmessung eine Platzbestimmung im Spektrum mittels einer willkürlichen Skala. Bei Streifenspektren wird ebenfalls die gleiche Art der Beschreibung vielfach angewendet. Sie genügt jedoch nur in wenigen Fällen. Sind die Streifen in dem untersuchten Spektrum breit, so muß man die Intensitätsverteilung in den Streifen entweder schätzen oder besser messen. Handelt es sich um Absorptionsspektra, so ist der Absorptionskoeffizient unter Berücksichtigung von Schichtdicke, Konzentration, Temperatur und Lösungsmittel zu messen. Man hilft sich hier vielfach damit, daß man keilförmige Absorptionsgefäße benutzt oder photographische Aufnahmen in größerer Zahl nebeneinander aufnimmt, indem man dabei jedesmal die Konzentration oder die Schichtdicke variiert. Man vgl. den Artikel „Absorption" 4ff.

In allen Fällen ist das Spektrum durch die Lage bezw. Wellenlänge seiner Hauptlinien, Banden und Streifen gekennzeichnet, unter Mitberücksichtigung der Intensitätsverteilung. Es hat sich gezeigt, daß in den meisten Fällen eine einzige Linie oder ein einziger Streifen charakteristisch für eine Substanz sind, so daß aus dem Vorhandensein des betreffenden Spektralteils mit Sicherheit auf das Vorhandensein der betreffenden Substanz schließen kann, vorausgesetzt daß die Lage und Intensitätsverteilung des betreffenden Streifens bezw. der betreffenden Linie genau genug bekannt sind. In Linienspektren genügt es in der Regel, eine starke Linie bis auf 0,01 A zu messen, um mit Sicherheit sagen zu können, welchem Element sie angehört. Im allgemeinen wird man jedoch keine so große Genauigkeit zu erreichen haben, da eine Substanz meist durch mehrere Linien oder Banden gekennzeichnet ist und man mehrere von diesen gleichzeitig finden muß. Damit wächst auch die Genauigkeit der Anwesenheitsbestimmung. So erkennt man die Anwesenheit von Natrium mit Sicherheit an den D-Linien, diejenige des Hämoglobins in Lösung aus dem Verhalten zweier kombinierter Absorptionsstreifen unter dem Einfluß gewisser Reagentien, andere Elemente an den sogenannten „Restlinien" (raies ultimes, ultimate lines). Eine Reihe von Körpern sind in kosmischen Lichtquellen auf Grund der Anwesenheit einer einzigen Linie entdeckt worden, z. B. das Helium, das als Bestandteil der Sonnenatmosphäre schon lange bekannt war, ehe es gelang, es auf der Erde aufzufinden. Andere Beispiele für die Leistungsfähigkeit der Spektralanalyse sind die Elemente Rb, Cs, G, In, A, Kr, X, Ra und zahlreiche seltene Erden.

Der negative Nachweis hat weniger Bedeutung. Er hängt von der Empfindlichkeit der Spektralreaktion und von Nebenumständen ab. So deutet die Abwesenheit der roten Wasserstofflinie in einer Spektralröhre mit großer Zuverlässigkeit auf die Abwesenheit merklicher Spuren von Wasserstoff. Dagegen fehlen die sonst so außerordentlich empfindlichen Natriumlinien in einer mit Chlordämpfen gespeisten Flamme, auch wenn Natrium in Ueberschuß vorhanden ist. Weiteres darüber findet man unter 5. Endlich ist zu beachten, daß eine genaue spektralanalytische Untersuchung die Berücksichtigung des ganzen Spektrums also insbesondere des Ultravioletts und des Ultrarots erfordert. So besitzen zahlreiche Kohlenstoffverbindungen im Ultraviolett sehr charakteristische Absorptions- und Emissionsspektra, z. B. das Benzol, während im sichtbaren Spektrum keine Reaktion nachzuweisen ist. Quecksilber liefert in einer Bunsenflamme keine sichtbare Emissionslinie, wohl aber im Ultraviolett eine starke Linie bei 2536. Die Kohlensäure gibt in derselben Weise ein charakteristisches und intensives Absorptions-

oder Emissionsband im Ultrarot. Aus diesem Grunde sind Kataloge und Tafeln der Absorptions- und Emissionsspektra, die den ganzen Spektralbereich umfassen, ein notwendiges Hilfsmittel zur qualitativen Spektralanalyse (s. Literatur).

4. Verschiedene Methoden der qualitativen Analyse. Die Methoden zur Anwendung der Spektralanalyse richten sich nach den speziellen Zwecken und nach der Menge der zur Verfügung stehenden Substanz. Allgemeine Regeln lassen sich nicht aufstellen. Es sollen daher im folgenden die Methoden einzeln besprochen werden. In vielen Fällen sind mehrere Verfahren gleichzeitig anwendbar. Handelt es sich um den Nachweis von Verbindungen, so wird man im allgemeinen Absorptionsspektra benutzen. Organische Körper wird man zunächst in Lösungen untersuchen. Handelt es sich um den Nachweis bestimmter Elemente, so sind im allgemeinen die Emissionspektra empfindlicher und bequemer. Hat man große Mengen von Substanz, so wird man mehrere Verfahren nebeneinander anwenden; bei geringen Mengen untersucht man eventuell mit Hilfe des Mikrospektroskops, also eines in den Tubus eines Mikroskopes eingebauten kleinen Spektralapparates, das Absorptions- oder Lumineszenzspektrum.

Bei sehr geringen Mengen benutzt man in Emission zweckmäßig die okulare Beobachtung. Stehen größere Mengen zur Verfügung, so ist in der Regel das photographische Verfahren vorzuziehen. Dazu wird mit einem Spektrographen (vgl. den Artikel „Spektroskopie“ 2) und farbenempfindlicher Platte eine Spektralaufnahme gemacht, indem man gleichzeitig ein Vergleichsspektrum, z. B. dasjenige eines Quecksilberbogens oder besser ein Eisenspektrum quer durch das zu prüfende Spektrum photographiert. In manchen Spektralapparaten finden sich auch Skalen, die man gleichzeitig mit dem zu untersuchenden Spektrum photographiert. Man kann dann, wenn es nicht auf Genauigkeit ankommt, die Skala in Wellenlängen kalibrieren und die Wellenlänge der zu prüfenden Banden oder Linien an der Skala abschätzen. Genauere Resultate erhält man mit einem Vergleichsspektrum. Hat dasselbe viele Linien wie z. B. das Eisen, so kann man in vielen Fällen die gesuchten Wellenlängen unmittelbar an den benachbarten Eisenlinien abschätzen. Anderenfalls mißt man mit einer Teilmaschine das Spektrum aus, oder man projiziert es auf eine passend eingeteilte Skala, an der man unmittelbar die Wellenlängen ablesen kann (Exner und Haschek) oder man bringt die Photographie mit einer im Gesichtsfelde eines Mikroskops befindlichen Skala zur Deckung und liest an ihr ab (de Gramont, Goldstein). Bei großer Erfahrung ist es in vielen Fällen möglich, Linien, Banden oder Streifen unmittelbar mit dem Auge zu erkennen. Zu sicherer Analyse gehört jedoch eine genaue Messung von wenigen oder eine weniger genaue Messung einer großen Zahl von Linien oder Banden. Durch Nichtbeachtung dieser Regel sind zahlreiche Irrtümer und Verwechselungen verursacht worden, die sich in der spektroskopischen Literatur finden. Endlich ist zu beachten, daß man Streifenspektra besser mit Apparaten von mäßiger Dispersion untersucht also z. B. Einprismenapparaten, Linienspektra dagegen bei großer Dispersion, mit der Einschränkung, daß Rücksicht auf die Lichtstärke des Apparates und die Menge der zur Verfügung stehenden Substanz genommen wird. Bei Absorptionsspektren ist, wenn möglich, ein photometrisches Verfahren anzuwenden (vgl. den Artikel „Absorption“ 8). Weitere Bemerkungen findet man bei der Besprechung der einzelnen Verfahren.

5. Empfindlichkeit des Verfahrens, (Einfluß von Beimengungen). Die Empfindlichkeit der Spektralanalyse ist sprichwörtlich und wird nur von einigen elektrometrischen Methoden übertroffen, mittels deren man radioaktive Substanzen untersucht. Dies gilt in gleichem Maße für die Emission wie für die Absorption. So sind häufig für Flammen- und Funkenreaktionen verschiedener Metalle z. B. der Alkalien Abschätzungen der Menge vorgenommen worden, die noch durch das Spektroskop nachweisbar war. Die Zahlen bewegen sich je nach der benutzten Verbindung, dem darin enthaltenen Metall und der Versuchsanordnung in der Nähe von $^1/_{10000}$ Milligramm und weniger. Manche Gase wie z. B. Helium sind in Vakuumröhren noch viel empfindlicher. Eine bestimmte Grenze läßt sich nicht angeben. Wenn eine Methode versagt, z. B. die Flammenuntersuchung, so liefert häufig eine andere, z. B. der Funken, noch eine Reaktion. Aehnlich empfindlich ist die Fluoreszenzreaktion gewisser gelöster Farbstoffe; $1 . 10^{-12}$ Milligramm Fluoreszein ist z. B. noch nachweisbar (Spring); auch in Absorption kann man minimale Mengen von Farbstoffen noch mit Sicherheit erkennen. Die Empfindlichkeit der Spektralanalyse muß um so höher eingeschätzt werden, als nachweislich immer nur ein verhältnismäßig kleiner Bruchteil der vorhandenen Moleküle gleichzeitig an der Emission oder Absorption teilnehmen. Da die Reaktion so sehr empfindlich ist, macht sie die Spektralanalyse geradezu für viele Zwecke unbrauchbar, indem man bei geeigneter Untersuchung gewisse Stoffe, wie z. B. Natrium, immer

findet. In anderen Fällen weist die Analyse Spuren von Substanzen nach, die auf kaum zu vermeidende Art aus dem Staub der Luft oder aus den benutzten Gefäßen in das betreffende Präparat hineingelangt sind, z. B. Kupfer aus dem Luftstaub, Schwefel aus Glasgefäßen u. a. m. Aus demselben Grunde gibt es bisher auch keine brauchbare quantitative Emissionsspektralanalyse.

Bei abnehmender Substanzmenge erfahren die Emissions- und Absorptionsspektra Veränderungen. Schwächere Linien bezw. diffuse Linien verschwinden, die Linienspektra werden immer linienärmer, zuletzt bleiben nur noch wenige Linien oder gar nur eine einzige Linie übrig. Dies pflegt bei den Serienspektren die Linie $m = 1$ der Hauptserien zu sein. Doch hat die Regel Ausnahmen. Die Linien von größter Persistenz (W. N. Hartley, Pollok und Leonard, Morrow) sind ersichtlich besonders zu analytischen Zwecken geeignet. Sie sind im Bogen identisch mit den „langen Linien" Lockyers, den Linien, die die größte Länge besitzen, wenn man ein Bild des Bogens auf den Spalt eines astigmatismusfreien Spektralapparates projiziert und den Spalt senkrecht zur Verbindungslinie der beiden Pole stellt. De Gramont, Hartley, Pollok u. a. haben diese „Restlinien" (raies ultimes, ultimate lines) besonders eingehend untersucht und dafür Listen sowie Anleitung zu ihrer Benutzung gegeben. Die Restlinien eines Spektrums sind nicht immer die stärksten. Weitere Eigenschaften sollen noch bei der Besprechung des Funkens, der Flammen und der Vakuumröhren erwähnt werden.

Bei Benutzung von Absorptionsspektren verschwinden zuerst die schwächeren und flacheren Absorptionsstreifen. Je nach der Gestalt der Absorptionskurven zerfallen andere Streifen in mehrere oder sie werden schmaler, bis zuletzt nur ein schwacher Streifen an der Stelle des Absorptionsmaximums übrig bleibt. Daß bei fortschreitender Verdünnung vielfach auch noch Aenderungen des Absorptionsspektrums infolge von chemischen Veränderungen und Dissoziationsvorgängen eintreten, soll an dieser Stelle nur erwähnt werden (vgl. den Artikel „Absorption").

Vergleicht man das Verhalten der verschiedenen Elemente und Verbindungen, so zeigt sich zunächst für die Emissionsspektralanalyse, daß die Empfindlichkeit der Spektralreaktion für die verschiedenen Körper äußerst verschieden ist und von der benutzten Methode abhängt. So ist z. B. die Spektralreaktion der Alkalien in der Bunsenflamme sehr empfindlich und zwar empfindlicher für Chlorate als für Sulfate. Elemente von hoher Verdampfungstemperatur, z. B. Platin oder manche Gase, z. B. Chlor oder Wasserstoff, geben nur unter bestimmten Bedingungen ein Spektrum in Flammen und werden in der Regel neben empfindlicheren Elementen gar nicht bemerkt. Bei Benutzung anderer Methoden der Leuchterregung ist das Verhältnis der Empfindlichkeit der Spektralreaktion das umgekehrte, z. B. in Vakuumröhren. So findet man in Funken nach geschmolzenen Mineralien neben den Linien der Metalle auch diejenigen der vorhandenen Metalloide, jedoch nur bei einer bestimmten Größe des Kondensators und der Selbstinduktion im Stromkreise. Endlich hängt die Reaktion der Elemente davon ab, ob die benutzte Methode der Leuchterregung geeignet ist, um vorhandene Verbindungen in genügendem Maße zu zerlegen. Man hat dies in früherer Zeit so ausgedrückt, daß man sagte: die Temperatur der Lichtquelle muß hoch genug sein, um die Substanzen zu verdampfen und zu dissoziieren. Versuche aus neuerer Zeit z. B. mit Chlorflammen scheinen jedoch darauf hinzudeuten, daß es nicht die Temperatur der Flammen usw. allein ist, die entscheidet, sondern daß daneben noch besondere chemische und andere Einflüsse in Betracht kommen. Es hängt also außer von der Temperatur der Lichtquelle noch von der Anwesenheit fremder Gase, der Atmosphäre, in der sich die Lichtquelle befindet, und anderen Umständen ab, ob eine Spektralreaktion eintritt. Hierin liegt ein großer Mangel der Emissionsanalyse, insofern als sie zwar eine sehr empfindliche Probe für eine Reihe von Elementen und Verbindungen liefert, dagegen nur bei Berücksichtigung verschiedener Methoden und vieler Vorsichtsmaßregeln zu einer vollständigen Analyse taugt.

Dasselbe gilt auch für die Absorptionsanalyse, die nur bei Benutzung zahlreicher spektraler Reaktionen eine vollständige Analyse liefert. Ihre Stärke besteht in der Empfindlichkeit der Probe auf gewisse Elemente und Verbindungen.

Aus diesem Grunde ist auch eine Anleitung zu einer vollständigen Spektralanalyse von Salzen, Gemischen, organischen Verbindungen, besonders Farbstoffen, an dieser Stelle nicht möglich. Es muß auf die am Schlusse genannte Literatur verwiesen werden, ferner auf die Angaben, die man in diesem Handbuche bei jeder einzelnen Körperklasse und in dem Artikel „Chemische Analyse" (anorganische, organische und mikrochemische Analyse) findet.

6. Emission. Die Emissionsspektralanalyse sei hier eingeteilt nach der Art der benutzten Lichtquellen. Es werden dabei nur die praktisch benutzten Verfahren genannt.

6a) Bogen. Die Bogenspektra eignen sich vorzugsweise zur Analyse von Metallverbindungen oder Gemischen. Man erhält zwar auch die meisten Spektra der Metalloide bei geeigneter Versuchsanordnung im Bogen. Allein diese Reaktion ist unempfindlich. Außer den Linienspektren der Elemente findet man im elektrischen Flammenbogen in der Regel zahlreiche Verbindungsspektra, deren Banden zum Teil sehr charakteristisch sind, z. B. die Bandenspektra der Verbindungen des Stickstoffs, des Sauerstoffs und der Kohle. In der äußeren Hülle des Bogens kann man ferner zahlreiche Bandenspektra von Metallverbindungen erhalten (Hagenbach). Zu analytischen Zwecken sind bisher jedoch nur die Linienspektra benutzt worden, die man bekommt, wenn man Elektroden aus Metallen oder Legierungen verwendet oder auf Elektroden aus Kohle oder Metallen Proben von den zu untersuchenden Körpern bringt. Es ist ausschließlich das photographische Verfahren und die Benutzung von beträchtlicher Dispersion zu empfehlen. Nur im Ultraviolett kommt man in der Regel mit einem Prisma aus. Am bequemsten ist der Kohlebogen. Stören die Banden seines Spektrums zu sehr, dadurch daß die zu untersuchenden Linien in sie hineinfallen, so kann man zweckmäßig Kupferbogen verwenden. Man benutzt Gleichstrom von 4 bis 5 Ampere und bringt, nachdem der Bogen eingebrannt ist, in eine nicht zu tief gebohrte Höhlung der positiven, unteren Kohle Proben der zu prüfenden Substanz. Der Bogen wird auf den Spalt projiziert. Da die meisten Metalle starke Linien in dem ganzen Bereiche des Spektrums besitzen, so genügt es in vielen Fällen, nur ein Stück des Spektrums zu photographieren. Man wählt dann den photographisch günstigsten Bereich unterhalb λ 4500. Die zu untersuchenden Substanzen benutzt man am besten in Form von wasserfreien Pulvern. Nicht jede Verbindung eignet sich in gleicher Weise. Manche Metalle bilden in dem positiven Krater einen Regulus, der die Kohle nicht berührt, z. B. Iridium, andere zerspratzen, manche Verbindungen verdampfen zu schnell, namentlich Haloidsalze. In vielen Fällen helfen Beimengungen von Flußmitteln. Allgemeine Regeln lassen sich nicht aufstellen. Die Spektra, die man photographiert, sind durch die Linienspektra der Metallsalze in den Kohleelektroden und die Bandenspektra der Kohle und ihrer Verbindungen stark verunreinigt. Man eliminiert diese fremden Linien durch Kontrollaufnahmen mit frischen Kohlen bei Berücksichtigung der Intensität; ferner dadurch, daß man sie relativ zum Vergleichsspektrum ausmißt. Die Ausmessung kann dabei nach einem der obengenannten Verfahren geschehen. Mittels der vorhandenen Wellenlängenkataloge lassen sich die gefundenen Linien unschwer identifizieren. Vergleicht man verschiedene Substanzen, z. B. verschiedene Fraktionen miteinander, so sind die Aufnahmen mit gleichen Substanzmengen (etwa 0,1 g jedesmal) unter den gleichen Bedingungen auszuführen. Die relative Intensität der einzelnen Linien gibt dann einen Anhalt zur Beurteilung der Menge des fraglichen Elementes, so daß man Fraktionen leicht in Reihen mit zunehmender Reinheit ordnen und so bestimmte Elemente isolieren kann Das Verfahren ist außerordentlich empfindlich, sehr zuverlässig und bei einiger Uebung auch bequem. Es genügt unter Umständen eine Menge von 0,1 g zur Durchführung einer vollständigen Analyse, wenn nicht zu geringe Mengen der fraglichen Substanz in dem betreffenden Präparat anwesend sind. Bei der Untersuchung der seltenen Erden hat diese Art der Analyse ausgezeichnete Dienste geleistet. In anderer Art benutzt, hat sie dazu gedient, die weite Verbreitung gewisser seltener Elemente auf der Erde nachzuweisen (z. B. des Scandiums, Eberhard). Es gibt kein metallisches Element, das nicht auf diese Weise auch in geringen Mengen mit Sicherheit nachgewiesen werden könnte.

6b) Funke. Die Untersuchung von Präparaten im elektrischen Funken kann auf drei verschiedene Weisen erfolgen. Entweder benutzt man Elektroden aus dem zu prüfenden Material. Als solches können sowohl feste Körper wie Lösungen dienen. Oder man bringt Proben der zu untersuchenden Substanz auf Elektroden aus Kohle, Graphit oder Gold, oder endlich, man schmilzt die zu untersuchenden Salze, Mineralien usw. auf einem Platinblech und läßt nach diesem Funken überschlagen (de Gramont). In allen Fällen ist das photographische Verfahren auch hier vorzuziehen. Die Spektra, die man erhält, hängen in ihrer Zusammensetzung von der Art des benutzten Funkens ab. Starke Kondensatorentladungen liefern bei Benutzung fester Elektroden oder geschmolzener Salze intensive Spektra, die jedoch verschieden sind von den Spektren im Bogen. Als Verunreinigung findet man die Spektra der Luft, des atmosphärischen Staubes, der Elektroden. Bei Anwendung von flüssigen Elektroden sind die erhaltenen Spektra meist relativ schwach; starke kondensierte Funken lassen sich nicht verwenden. Man benutzt Induktorien von kleiner Schlagweite und relativ dickem sekundären Draht. Es eignet sich dies Verfahren daher mehr zu okularer Beobachtung (Lecoq de Boisbaudran, Demarçay, Hartley, de Gramont). Es ist besonders sparsam (Crookes, Ra). In allen Fällen sieht man neben den Linienspektren der metallischen Elemente in der untersuchten Substanz die Linienspektra der Metalloide, wenn auch weniger stark. Dies trifft insbesondere für die Funkenanalyse geschmolzener Substanzen zu. Die gleichzeitig sichtbaren Bandenspektra seien hier übergangen. Schaltet man in den Entladungskreis eine Selbstinduktion, so geht eine Veränderung im Spektrum vor sich, die sich in manchen, nicht in allen Fällen durch Vergrößerung der Kapazität kompensieren läßt. Die Metalloidlinien werden schwächer, um schließlich ganz zu verschwinden. Auch die Intensität der Metalllinien ändert sich. Bei genügend großer Kapazität erhält man schließlich nur noch die Restlinien.

Bei photographischer Untersuchung ist das Verfahren dasselbe wie beim Bogen. Bei okularer Beobachtung ist es unter Umständen möglich, noch Restlinien für Momente aufblitzen zu sehen und so geringste Spuren einer Substanz zu entdecken. Die Funkenanalyse ist nicht weniger empfindlich als die Bogenanalyse. Sie erfordert sogar meist noch geringere Substanzmengen. Besonders eignet sie sich zur Untersuchung von Körpern, die im Bogen verhältnismäßig linienarme Spektra geben, z. B. von Tellur und zur

Analyse von Mineralien, Schlacken usw. Die Funkenanalyse hat ebenfalls bedeutende Leistungen aufzuweisen. Sie ist schon von Bunsen ausgearbeitet, dann namentlich von Lecoq de Boisbaudran, Hartley, de Gramont, Demarçay, Exner und Haschek u. a. mit Erfolg benutzt worden.

Statt den Funken nach Lösungen schlagen zu lassen, kann man auch die funkenähnliche Entladung benutzen, die an der Kathode einer einem Wehneltschen Unterbrecher nachgebildeten Anordnung innerhalb von leitenden Flüssigkeiten auftritt (v. Bolton, Morse). Das Verfahren hat sich jedoch nicht eingebürgert.

6c) Flammen. Das älteste Mittel zur Emissionsspektralanalyse besteht in der Benutzung von Flammen. Jede Art von Flammen ist angewendet worden. In der Praxis haben jedoch nur drei Arten von Flammen Bedeutung erlangt: die Bunsenflamme, die Knallgasflamme und die beim Bessemerprozeß auftretende Flamme. In allen diesen Flammen tritt als Eigenspektrum das sogenannte Swanspektrum auf, das aus den Banden des Kohlenstoffs und den sogenannten Kohlenwasserstoffbanden besteht. Außerdem erhält man im Ultraviolett die sogenannten Wasserdampfbanden und im Ultrarot weitere Banden, u. a. diejenigen der Kohlensäure und des Wasserdampfes. In einigen Fällen sind auch die Wasserstofflinien beobachtet worden.

Die Einführung der zu prüfenden Substanzen in die Bunsenflamme kann auf die verschiedenste Art erfolgen, z. B. mit Hilfe dünner, zu kleinen Oesen gebogener Platindrähte, in deren Oese eine Spur der Probesubstanz zu einer kleinen Perle geschmolzen oder ein Tropfen der zu prüfenden Lösung kapillar festgehalten wird, eventuell nach Zufügung von Borsäure, Fluorsilikaten und Anfeuchtung mit Fluorwasserstoff- oder Chlorwasserstoffsäure. Die verschiedenen Verbindungen sind verschieden empfindlich. Man erhält auf dem angegebenen Wege Spektra der Alkalimetalle, die aus den Restlinien bestehen, auch bei sehr geringen Substanzmengen. Die Erdalkalien sind ebenfalls sehr empfindlich. Hier treten besonders Bandenspektra auf. Die Reaktion eignet sich bei Benutzung kleiner Mengen in erster Linie zu okularer Beobachtung. Will man photographieren, so muß die Flamme dauerhafter gefärbt werden. Dies geschieht durch Beimengung zerstäubter Salzlösungen zu der mit dem Gase zu mischenden Luft, entweder durch einen gewöhnlichen Zerstäuber (Gouy, Ebert) oder durch Durchtreiben von Preßluft durch die Lösung (Beckmann) oder durch Ueberleiten der Brennerluft über Salzlösungen, aus denen durch chemische Reaktionen oder Elektrolyse Wasserstoff entwickelt wird (Beckmann) oder durch andere Mittel, die man je nach der Menge der zur Verfügung stehenden Substanz zu wählen hat. Bei photographischer Untersuchung zeigt sich, daß die meisten Elemente im Bunsenbrenner Linien- und Bandenspektra liefern. Dies gilt besonders von der Explosionszone im inneren Kegel. Die Spektra sind hier zum Teil sogar sehr linienreich und reichen weit ins Ultraviolett. Immerhin ist die Empfindlichkeit nicht so groß, daß man sie zweckmäßig zur Analyse verwendete. Es wird daher die Bunsenflammenreaktion hauptsächlich für die Alkalien, Erdalkalien Cu, B, Tl, In verwendet. — Für alle Metalle und manche Metalloide ist die Knallgasflamme brauchbar. Die Spektra, die man in ihr erhält, gleichen in vieler Hinsicht den Bogenspektren. Neben Linienspektren findet man zahlreiche charakteristische Bandenspektra. Die Einführung der Substanzen geschieht am einfachsten mittels dünner Kohlenstäbe oder Blättchen von Disthen ($Al_2O_3 . SiO_2$), an deren Spitze die betreffende Substanz aufgeschmolzen oder aufgelegt wird. Die Spitze wird in die Explosionszone gebracht. Bei größeren Substanzmengen kann man auch Rollen nach Art von Zigaretten oder Stifte aus dem Prüfungsmaterial herstellen oder die gepulverte Substanz einstreuen. Die Helligkeit der Spektra ist sehr groß, namentlich wenn man die Flamme in der Längsrichtung beobachtet. Es eignet sich besonders das photographische Verfahren. Dasselbe wird in der gleichen Weise angewendet, wie beim Bogen und Funken. Diese Art der Analyse ist namentlich von Hartley und Lockyer (Analyse von Meteorsteinen, Hüttennebenprodukten, Mineralien) mit Erfolg benutzt worden. — Die Restlinien der Metalle in H-O-Flammen hat Hartley bestimmt.

Endlich sei der Bessemerflamme gedacht, deren spektroskopische Untersuchung technisch benutzt wird. Einzelheiten müssen hier übergangen werden.

6d) Geißlerröhren. Die Emissionsspektralanalyse von Gasen wird am besten mit Hilfe von Geißlerröhren ausgeführt. Allerdings kann man auch feste Körper in Vakuumröhren verdampfen oder durch den Einfluß der Entladung selbst Salze oder Verbindungen in Vakuumröhren zersetzen (Goldstein, Scharbach, Morrow, Pollok). Man benutzt dazu am besten Quarzröhren, die man bis auf 2—3 mm evakuiert und in deren Kapillare man einen Tropfen der zu prüfenden Lösung durch Erhitzen der Röhre verdampfen läßt. Man muß ferner unterscheiden zwischen der Leuchterregung in der positiven Säule und der Leuchterregung in den verschiedenen Arten von Strahlen, die beim Stromübergang bei vermindertem Drucke auftreten. Auf diese soll im nächsten Abschnitt eingegangen werden. Zum Betriebe der Geißlerröhren verwendet man am einfachsten die Entladung von Induktorien mittlerer Größe. Man erhält dann in der Regel verschiedene Spektra, wenn man mit oder ohne Leidener Flasche bezw. Funkenstrecke im Entladungskreis arbeitet. Bei Benutzung von Leidener Flasche und Hilfsfunkenstrecke erhält man in nicht zu weiten Röhren in der Regel Linienspektra. Für weitere Einzelheiten vgl. man den Artikel „Spektroskopie", 15. Die zu prüfenden Gase werden am besten mit Hilfe einer Töplerschen Pumpe, die eine Wiedergewinnung der nicht benutzten Gase gestattet, in ein wiederholt weitgehend unter Stromdurchgang evakuiertes Rohr eingefüllt; das Rohr wird bei Stromdurchgang wiederholt mit den Gasen ausgespült, wenn der vorhandene Vorrat es gestattet. Auf die Einzelheiten der Technik kann hier nicht eingegangen werden. Je nach der untersuchten Substanz ist ein bestimmtes Druckintervall am günstigsten. In der Regel wird man bei nicht zu kleinen Drucken arbeiten und die zu prüfende Röhre mit der Pumpe in

Verbindung lassen. Die Untersuchung erfolgt am besten auf photographischem Wege. Als Verunreinigung treten auf die Linien der Luft, des Wasserstoffs, des Quecksilbers (aus der Pumpe), des Aluminiums, der Kohle, die Banden des Stickstoffs, Cyans, Kohlenstoffs, Kohlenoxyds, Wasserdampfs. Auch Linien des Chlors, Schwefels, Natriums, Siliciums, Calciums, Argons u. a. können unter Umständen mit erhalten werden. Die Reaktion ist außerordentlich empfindlich, hängt allerdings von der Art des Betriebes der Röhren und der Natur und der Menge fremder neben dem zu prüfenden anwesender Gase ab. So verschwinden z. B. die Argonlinien in einer Menge von Stickstoff, die ein gewisses, von der Betriebsart der Röhre abhängiges Maximum übersteigt; die Sauerstoffbanden und Linien verschwinden in einer mit atmosphärischer Luft betriebenen Geißlerröhre gegenüber dem Stickstoff und den Banden der NO-Verbindungen, wenn man gewisse Bedingungen einhält. In der Regel findet man bei genauerer photographischer Untersuchung indes auch dann noch Spuren der Spektra von Beimengungen, wenn mit dem Auge nichts mehr wahrgenommen werden kann. Auch diese Art der Analyse hat große Erfolge aufzuweisen. Mit ihrer Hilfe sind die Edelgase (z. B. He, A, Ne, Kr, X) entdeckt worden, und durch sie hat man Aufschluß über die Bildung von He aus radioaktiven Körpern gewonnen.

6e) Lumineszenzerscheinungen. An erster Stelle sei hier die Fluoreszenz, also die Leuchterregung durch Licht genannt, worunter die Phosphoreszenz mit verstanden sein soll, da die Unterschiede beider Erscheinungen für die Analyse keine Rolle spielen. Die Fluoreszenz der Gase hat bisher keine analytische Bedeutung. Dagegen ist die Fluoreszenz der Lösungen und der festen Körper in neuerer Zeit in steigendem Maße zu analytischen Zwecken verwendet worden. Bei Lösungen organischer Substanzen wird die Fluoreszenzanalyse speziell zu Schlüssen auf Konstitutionsänderungen benutzt. Zur Durchführung von Analysen fehlt es bisher an einem systematisch gesammelten und geordneten Beobachtungsmaterial gleich demjenigen von Formánek für die Absorption von Farbstoffen. Die Fluoreszenzuntersuchung von festen Körpern wird zweckmäßig in ultraviolettem Lichte vorgenommen. Hierzu eignen sich die Ultraviolettfilter (Wood, Lehmann) in Verbindung mit Eisenbogen. Zur Analyse von Pulvern und geringen Substanzmengen bedient man sich dabei des Fluoreszenzmikroskopes, das mit ultraviolett-durchlässigem Beleuchtungsapparate und „Uviol"filter versehen, die Präparate mit ultraviolettem Lichte beleuchtet, während in dem sichtbaren Fluoreszenzlichte beobachtet wird. Neben anorganischen Präparaten eignen sich auch sehr viele organische Präparate zu dieser Art der Analyse (Goldstein), namentlich zur Probe auf Reinheit. Die Erscheinungen werden dadurch kompliziert, daß je nach der Dauer der Belichtung Aenderungen im Fluoreszenzspektrum auftreten. Das Verfahren ist ebenfalls sehr empfindlich, wie schon das Verhalten der Phosphore zeigt, deren Phosphoreszenzbanden bei Anwesenheit geringster Spuren von Beimengungen sich ändern.

Eine zweite Art der Leuchterregung besteht in der Anwendung von Kathodenstrahlen (Crookes, Urbain, Lecoq, Auer v. Welsbach u. a.). Man bringt dazu die zu prüfende Substanz in ein hohes Vakuum und läßt nicht zu intensive Kathodenstrahlen auf ihre Oberfläche fallen. Man erhält alsdann verhältnismäßig intensive, aus Linien und Banden bestehende Emissionsspektra, die für die Zusammensetzung der untersuchten Substanz charakteristisch sind. Auf diesem Wege sind namentlich die seltenen Erden mit Erfolg untersucht worden. Mit seiner Hilfe ist es gelungen, nicht nur Fraktionen in Reihen zu ordnen, sondern mehrere seltene Erden völlig zu isolieren (z. B. Cassiopeium), andere zu zerlegen. Dabei werden die zu prüfenden Substanzen in einem phosphoreszenzerregenden „Lösungsmittel", z. B. Kalk, „gelöst". Für das Verhalten der einzelnen Banden, das Optimum ihrer Intensität und ähnliche Fragen sei auf das Werk von Urbain verwiesen. Besonders intensiv werden Fluoreszenz- und Kathodolumineszenz, wenn man die betreffenden Substanzen auf tiefe Temperaturen bringt (vgl. „Seltene Erdmetalle" im Artikel „Borgruppe").

Auch organische Körper können auf die gleiche Weise untersucht werden, speziell bei Anwendung tiefer Temperaturen (flüssige Luft). Man erhält dann wiederum je nach der Dauer der Bestrahlung verschiedene Spektra, die für verschiedene Körperklassen und Gruppen charakteristisch sind (Goldstein, Fischer). Daß man auch Kanalstrahlen, Tribolumineszenz und andere Lumineszenzarten zu analytischen Zwecken verwenden kann, sei hier nur erwähnt.

7. Zur speziellen Analyse. In der folgenden Uebersicht sei das Verhalten der verschiedenen Elemente bei der Emissionsspektralanalyse kurz zusammengestellt. Dabei bedeutet L ein Linienspektrum, Bd ein Bandenspektrum, Verb ein Bandenspektrum einer Verbindung. Für das Verhalten der organischen Körper sei auf die Artikel „Lumineszenz", „Fluoreszenz" und „Phosphoreszenz" verwiesen, da das Material für den hier zur Verfügung stehenden Raum zu umfangreich ist.

Bogen. Keine Spektra: Edelgase Br, Cl, J, F, S, Se; nur unter besonderen Umständen Spektra: N, O, Se, H; wenige, einzelne Linien: C, As, B, Be, P, Ge, Te, Sb; hauptsächlich Banden: C, B, zahlreiche Verbindungen; Linienspektra: die übrigen Elemente.

Funke. a) Kondensierter Funke, feste Elektroden: Schwache Linienspektra: S, Cl, Br, J, F, Se; Linienspektra mit wenigen Linien: B, P; starke, linienreiche Linienspektra: die übrigen Elemente, mit Ausnahme der Gase; die Gase: Luft, N, O, A, He, X, Kr, Ne, H, Cl geben Linienspektra, wenn man Funken, kondensiert oder nichtkondensiert, durchschlagen läßt.

b) Kondensierter Funke nach geschmolzenen Salzen oder nach Mineralien oder nach Salzkappen auf Kohleelektroden: man erhält die Spektra aller Komponenten, sowohl der Metalle wie der Metalloide.

c) Nichtkondensierter Funke nach Mineralien oder Salzen: Hauptlinien der Metalle, Linien der umgebenden Atmosphäre.

d) Schwachkondensierter Funke nach Flüssigkeiten: Schwache Spektra: S, Se, Cl, Br, J, F, O, P, C; intensive Linienspektra gemischt mit Bandenspektren sowie den Spektren von N und H_2O als Verunreinigung: die übrigen Elemente.

e) Kondensierte Funken und Selbstinduktion: Linienspektra aller Metalle. Es verschwinden: Luftlinien, S, Se, Cl, Br, J, P.

Flammen. Bunsenflamme: keine Spektra oder schwache Spektra im Ultraviolett: Edelgase, H, N, O, F, Te; Linienspektra, empfindlich: Alkalien Tl, In; Linien und Banden gemischt, empfindlich: Ca, Sr, Ba, Mg, Ra; Banden (Verb), empfindlich: Mn, Cu, Au, Pb, Bi, Nd, Pr, P, Se, S, C, Si, B, J; die übrigen Elemente liefern zwar Spektra, die sich jedoch nicht zur Analyse eignen.

Knallgasflamme. Linienspektra: bei geringsten Spuren: K, Na, Rb, Cs, Ca, Sr, Ba, Cu, Ag, In, Tl, Ga, Bi, Pb, Cr, Mn, Ni, Fe, Co; bei geringen Mengen: Li, Au, Cd, Sb, Sn; nur bei größeren Mengen: Cl, B, Pr, Nd, Mg, Al, Te, S, Se, Ir, Zn, Ce; Bandenspektra: bei größeren Mengen: Be, Mg, Zn, Cd, B, Al, In, Tl, Sn, Pb, Ag, P, As, Sb, Bi, Cr, Se, Tl.

Geißlerröhren. Intensive Spektra: Edelgase (L), H (L), Alkalien (L), C (Verb), Si (Verb), Sn (L), Zn, Cd, Hg (L, Bd), N (L, Bd), P (L, Bd), As (L, Bd), Sb (L), O (L, Bd), S (L, Bd), Se (L, Bd), Cl (L), Br (L, Bd), J (L, Bd). Die übrigen Elemente geben Linien- oder Bandenspektra bei Benutzung von Bogenentladungen im Vakuum.

Lumineszenz. a) Fluoreszenz: Flüssigkeiten: Benzolderivate, zahlreiche organische Verbindungen. Dämpfe: J, Br, Alkalien, S, Se, Hg, Cd, Benzolderivate. Feste Körper: zahlreiche organische Verbindungen, feste Lösungen der seltenen Erden, von Cr, Mn, Bi, Pb, Mineralien.

b) Kathodenstrahlen: zahlreiche feste organische Substanzen (Bd), feste Lösungen von Metallen, besonders seltenen Erden (Bd, L).

8. Absorption. Zur Untersuchung der Absorption benutzt man als Lichtquelle Flammen, Glühlampen, Bogenlicht, Nernstbrenner, Auerbrenner, Sonnenlicht, stark kondensierte Funken nach Legierungen (Edersche Legierung), im Ultraviolett Funken zwischen Aluminiumelektroden unter destilliertem Wasser (Konen). Bei geringeren Ansprüchen an die Genauigkeit wird okular untersucht, anderenfalls photometriert oder mittels Thermosäule und photographisch das ganze Spektrum durchmustert. Es genügt meist mäßige Dispersion (ein Prisma). Unter sonst gleichen Umständen hängt die Empfindlichkeit der Reaktion von der benutzten Dispersion und Spaltbreite ab. Diffuse Banden sind bei geringerer Dispersion leichter zu erkennen, scharfe Absorptionslinien bei engem Spalte. Auch hängt die Empfindlichkeit der Reaktion von der zur Verfügung stehenden Schichtdicke und Konzentration ab. Ganz geringe Mengen untersucht man mit dem Mikrospektroskop. Meist genügt eine angenäherte Wellenlängenmessung für das Absorptionsmaximum der Hauptbanden unter Berücksichtigung der Intensitätsverteilung. Anderenfalls ist das Messungsverfahren dasselbe wie bei den Emissionsspektren. Wenn irgend möglich, ist die Absorption bei verschiedenen Konzentrationen bezw. Schichtdicken zu prüfen. Auch läßt sich die Sicherheit der Bestimmung in der Regel durch Nebenreaktionen erhöhen (Einfluß von Zusätzen, Einfluß der Temperatur). Die photometrischen Verfahren sollen hier übergangen werden (vgl. den folgenden Artikel „Quantitative Spektralanalyse").

8a) Feste Körper. Man bringt feste Körper (Gläser, Kristalle) unmittelbar vor den Spalt, auf den man die Lichtquelle projiziert oder vor dem die Lichtquelle in hinreichender Entfernung aufgestellt wird, jedoch nicht weiter, als daß die Collimatorlinse voll beleuchtet bleibt. Ist das Objekt zu dunkel, so schneidet man aus ihm Platten oder untersucht es an den Kanten. Farbige Gläser oder feste Lösungen von Farbstoffen geben Absorptionsstreifenspektra. Bei den kristallisierten Salzen der seltenen Erden, einigen Gläsern, z. B. Didymglas, den Uransalzen und manchen Kristallen, z. B. Rubin, erhält man relativ scharfe Streifen, die unter Umständen Absorptionslinien gleichen und eine genaue Wellenlängenbestimmung erlauben. Sie liefern besonders zuverlässige Bestimmungen. Bei tiefer Temperatur werden diese Streifen schärfer oder lösen sich in Linien auf (z. B. Uransalze).

8b) Lösungen. Von den Lösungen gilt hinsichtlich der Art der Untersuchung das gleiche wie von den festen Körpern. Man benutzt Küvetten mit parallelen Wänden, vorteilhaft Gefäße nach Baly (vgl. den Artikel „Absorption"), die man unmittelbar vor den Spalt setzt. Die Mannigfaltigkeit der Erscheinungen und der Einzelheiten der Untersuchung ist hier außerordentlich groß. Es muß dafür auf die im Anhange genannte Spezialliteratur verwiesen werden.

α) Organische Stoffe. In erster Linie sind die künstlichen Farbstoffe zu nennen. Eine Systematik derselben auf Grund einer Untersuchung einer sehr großen Zahl von Präparaten findet man in dem Werke von Formánek und Grandmougin. Die Analyse stützt sich dabei auf die Beobachtung des sichtbaren Absorptionsspektrums einer passend verdünnten Lösung unter Berücksichtigung des Einflusses des Lösungsmittels und gewisser Reaktionen, die zwischen Farbstoffen mit ähnlichen Absorptionsspektren unterscheiden. Dazu werden die Farbstoffe zunächst nach dem Farbton der Lösung in eine Reihe von Klassen geteilt, in denen je nach dem Charakter des Absorptionsspektrums wieder Unterklassen gebildet werden. Für Einzelheiten des Analysenverfahrens muß auf das genannte Werk verwiesen werden. Es ist möglich, mittels der Bestimmungstabellen und Hilfsbeobachtungen gegebene Farbstoffe mit großer Sicherheit zu erkennen. Bei Berücksichtigung des Ultraviolett besitzen die meisten untersuchten organischen Verbindungen mehr oder weniger charakteristische Absorptionsspektren in dem eben erörterten Sinne. Manche unter ihnen, z. B. viele Benzolderivate, besitzen Bandenspektra mit relativ scharf begrenzten Einzelgruppen, die die betreffende Substanz eindeutig kennzeichnen (z. B. Naphtalin, Benzol, Anilin).

Dasselbe gilt für viele natürliche Farbstoffe, z. B. Chlorophyllfarbstoffe, Blutfarbstoffe, Harnfarbstoffe, Pflanzenfarbstoffe. Die Spektralanalyse ihrer Absorptionsspektra hat sich vielfach als wichtiges Hilfsmittel zur Trennung und Erkennung von bestimmten Farbstoffen und Beziehungen zwischen ihnen (Blutfarbstoffe, Chlorophyllfarbstoffe) erwiesen. Auch für die Untersuchung von Nahrungsmitteln und für forensische Zwecke hat die Absorptionsspektralanalyse Wichtigkeit gewonnen (z. B. Blut-

bestimmung). Einzelheiten können hier nicht wiedergegeben werden. Die Mikrospektralanalyse hat endlich besondere Bedeutung für eine Reihe von botanischen und zoologischen Untersuchungen (Flechtenfarbstoffe, Assimilation usw.).

Eine Zwischenstufe zwischen den organischen und anorganischen Verbindungen nehmen die Farblacke, Verbindungen von Metallen mit organischen Farbstoffen ein, wie sogleich noch auszuführen ist.

β) Anorganische Körper. Eine große Anzahl anorganischer Verbindungen lieferte farblose Lösungen, die entweder nur in unsichtbaren Teilen des Spektrums absorbieren, oder deren Absorptionsspektrum aus breiten Streifen besteht, die sich zur Analyse nicht eignen. In diesem Falle läßt sich mit Hilfe der eben erwähnten Farblacke vielfach eine empfindliche Analyse ausführen (Vogel, Formánek). Das Verfahren ist besonders von Formánek unter Benutzung der Alkannafarblacke ausgearbeitet worden und für zahlreiche Metallsalze verwendbar. Besonders charakteristisch sind die Absorptionsspektra der Mg-, Al-, Be-, Ni-, Cu-Verbindungen sowie der Verbindungen der seltenen Erden. Nur wenige Metalle, z. B. Silber, liefern keine sichtbaren Absorptionsbanden. Man findet Tabellen und Anleitung zur Benutzung dieser Spektra in dem Lehrbuche von Formánek.

Bei geringer Färbung besitzen die Lösungen der seltenen Erden höchst charakteristische Absorptionsspektra, deren Streifen vielfach Linien gleichen und wenige A breit sind. Es sind daher die Absorptionsspektra dieser Substanzen als wichtige Kriterien bei der Trennung der seltenen Erden benutzt worden. Aehnliches gilt für die Uranverbindungen, wenn auch in geringerem Maße.

Auch zahlreiche stark gefärbte anorganische Körper besitzen in Lösung charakteristische Absorptionsspektra. Dies gilt für die Verbindungen des Chroms, des Kobalts, Nickels, Mangans (z. B. des Kaliumpermanganats), sowie eine Reihe von Kupfer- und Eisensalzen. Unter Umständen gelingt ein spektraler Nachweis, indem man die betreffende gelöste Substanz in eine geeignetere Verbindung überführt. Einzelheiten findet man in den am Schlusse genannten Lehrbüchern.

c) Gase. Auch eine Reihe von Gasen besitzen charakteristische Absorptionsspektra, die sich zur Spektralanalyse eignen. Dies gilt zunächst von manchen stark gefärbten Gasen wie den Sauerstoffverbindungen des Stickstoffs, Chlor, Brom, Jod, Selen, und einer Anzahl von Verbindungen, z. B. den Chlorsäuren. Im Ultrarot ist die Absorption der Kohlensäure und des Wasserdampfes ein empfindliches Reagens, im Ultraviolett besitzen zahlreiche Gase (z. B. Ozon, Dämpfe von Benzolderivaten) charakteristische Absorption.

Die ausgedehnteste Anwendung findet die Absorptionsspektralanalyse der Gase in der Astrophysik, wo sie zur Analyse der Erdatmosphäre und der Atmosphären der Himmelskörper benutzt wird (vgl. den Artikel „Spektroskopie" 16).

9. **Analyse von Gemischen.** Eine Anleitung zur Anwendung der Spektralanalyse auf vorgelegte Aufgaben kann hier nicht gegeben werden. Es seien nur in Kürze einige allgemeine Regeln für die Anwendung der Spektralanalyse zusammengestellt. Dabei ist im Auge zu behalten, daß die Spektralanalyse stets nur ein Teil einer Analyse ist, und die analytischen Methoden der Chemie nicht ersetzen kann. Es wird daher stets eine spezielle Aufgabe vorliegen und im allgemeinen bereits feststehen, in welcher Richtung die Untersuchung zu führen ist.

Handelt es sich um die Untersuchung von anorganischen Salzgemischen auf das Vorhandensein bestimmter Elemente mit Spektren, die nicht leicht in Flammen kommen, z. B. der seltenen Erden, so gibt die Untersuchung der Bogenspektra das sicherste und vollständigste Mittel zur Analyse. Elemente mit wenigen Bogenlinien, wie z. B. Te, werden besser in Funkenspektren untersucht. Für eine Reihe anderer Körper, z. B. Legierungen, benutzt man ebenfalls besser Funkenspektra.

Mineralien, Schlacken usw. werden am bequemsten mittels Funkenanalyse untersucht oder in der Knallgasflamme.

Proben auf Alkalien, alkalische Erden, In, Tl, Cu macht man okular in der Bunsenflamme. Bei Gemischen dieser Elemente sind dabei gewisse Regeln zu beobachten.

Neben der Emissionsanalyse benutzt man die Absorptionsanalyse; bei seltenen Erden und Uransalzen prüft man die Lösungen direkt, bei farblosen Lösungen wird die Farblackanalyse verwendet. — Gefärbte Gase untersucht man zunächst in Absorption, dann in Vakuumröhren.

Organische Körper werden meist in Lösungen untersucht. Künstliche Farbstoffe bestimmt man mittels der Tabellen von Formánek, natürliche mit Hilfe der Spezialreaktionen der betreffenden Farbklassen (vgl. die Literatur).

Damit sind nur die gebräuchlichsten Methoden genannt. In der Praxis werden die verschiedensten Verfahren je nach der persönlichen Erfahrung des Einzelnen nebeneinander verwendet.

Literatur. *An erster Stelle ist das Handbuch der Spektroskopie von* ***H. Kayser*** *(6 Bände, Leipzig 1901—1912) zu nennen, speziell die Bände* 5 *und* 6. *Man vgl. auch die Literaturangaben am Schlusse des Artikels „Spektroskopie". — Lehrbücher der qualitativen Spektralanalyse:* ***A. de Gramont,*** *Notions d'analyse spectrale, Paris 1911.* — ***G. Urbain,*** *Introduction à l'étude de la spectrochimie, Paris 1911. Deutsche Uebersetzung, Leipzig 1913.* — ***H. W. Vogel,*** *Praktische Spektralanalyse. I. Teil, 2. Aufl., Berlin 1889.* — ***H. und P. Krüss,*** *Kolorimetrie und quantitative Spektralanalyse. 2. Aufl., Hamburg 1909.* — ***J. Formánek,*** *Die qualitative Spektralanalyse. 2. Aufl., Berlin 1905.* — ***J. Formánek und E. Grandmougin,*** *Untersuchung und Nachweis organischer Farbstoffe auf spektroskopischem Wege. 2. Aufl., 2 Bände, Berlin 1908 bis 1913.* — ***E. Baur,*** *Abriß der Spektroskopie und Kolorimetrie. Leipzig 1907.* — ***H. Konen,*** *Lehrbuch der Spektroskopie, Leipzig 1913 (erscheint Herbst 1913).* — ***H. Konen,*** *Das Leuchten der Gase und Dämpfe, Braunschweig 1913. — Wellenlängentabellen:* ***Kaysers*** *Handbuch. Bd.* 5 *u.* 6. — ***F. Exner und E. Haschek,*** *Die Spektren der Elemente. 3 Bände, 2. Aufl., Wien 1911. — Atlanten:*

A. Hagenbach und H. Konen, *Atlas der Emissionsspektren der meisten Elemente. Jena 1905.* — ***J. M. Eder und E. Valenta,*** *Atlas typischer Spektren. Wien 1911.* — ***A. Demarçay,*** *Spectres électriques, Paris 1895 (Funken nach Lösungen).* — ***H. S. Uhler und R. W. Wood,*** *Atlas of absorption spectra. Washington, Carnegie Institution 1907.* — *Restlinien: Arbeiten von* ***de Gramont, W. N. Hartley, J. Pollok.*** *Man vergl. auch den Artikel „Spektroskopie."*

H. Konen.

Spektralanalyse.

Quantitative Spektralanalyse und Kolorimetrie.

1. Einleitung. 2. Theoretische Grundlagen kolorimetrischer Messungen. 3. Extinktionskoeffizient und Absorptionsverhältnis. 4. Die Praxis der quantitativen Spektralanalyse. 5. Anwendungen der quantitativen Spektralanalyse. 6. Die Kolorimeter. Kolorimeter nach C. H. Wolff. Kolorimeter nach Duboscq (Laurent). Farbenmaß nach Stammer. Kolorimeter nach Gallenkamp. Kolorimeter nach Steiger. Kolorimeter nach Donnan. Kolorimeter mit Lummer-Brodhunschem Prismenpaar. Diaphanometer nach König. Polarisationskolorimeter nach Krüß. 7. Anwendungen der Kolorimetrie.

1. Einleitung. Unter quantitativer Spektralanalyse und Kolorimetrie versteht man im allgemeinen die Bestimmung des Farbstoffgehalts einer Flüssigkeit durch Feststellung ihrer Lichtdurchlässigkeit. Dabei ist Kolorimetrie als die allgemeine Bezeichnung anzusehen, die Messung der Stärke der Färbung ist die Aufgabe, um die es sich handelt. Sie kann auf sehr verschiedene Weise gelöst werden; die quantitative Spektralanalyse ist ein besonderer Weg der Lösung, in vielen Fällen der vollkommenste. Alle diese Wege können als kolorimetrische bezeichnet werden, doch tragen gewöhnlich nur die einfacheren diesen Zwecken dienenden Apparate, bei welchen auf eine spektrale Zerlegung des benutzten Lichtes verzichtet wird, den Namen Kolorimeter.

Zur Kolorimetrie kann man schon das Verfahren rechnen, Farbstoffe, die zum Färben benutzt werden sollen, durch Ausfärbeversuche auf Fäden von Wolle, Baumwolle oder Seide zu untersuchen. Behandelt man abgewogene Mengen von Stoffen mit abgemessenen Mengen der Farbstofflösung, so erhält man durch den Ausfall der Färbung einen Anhalt über die Konzentration der Lösung.

Ein etwas feineres Verfahren besteht darin, die zu untersuchende Flüssigkeit in ein Reagenzglas zu geben, in ein zweites eine Normallösung desselben Körpers und letztere so lange in meßbarer Weise zu verdünnen, bis beide dem Augenschein nach gleich gefärbt sind.

Derartige Versuche gewinnen aber bedeutend in bezug auf die Leichtigkeit der Ausführung und die Genauigkeit der Ergebnisse, wenn man beide Lösungen gleichzeitig und unmittelbar nebeneinander, etwa in dem Okular eines Fernrohres, beobachten kann. Die wissenschaftliche und die wissenschaftlich-technische Kolorimetrie benutzt deshalb Instrumente, durch welche vermittels geeigneter optischer Vorrichtungen die Strahlen, welche durch die Lösungen treten, unmittelbar nebeneinander gelagert werden. Die folgenden Ausführungen ziehen deshalb nur solche Methoden in Betracht.

2. Theoretische Grundlagen kolorimetrischer Messungen. Es soll im folgenden die Abhängigkeit dargestellt werden, in welcher sich die von einer Lösung hindurchgelassene Lichtmenge von der Konzentration der Lösung und ihrer Schichtdicke befindet.

Zwei Lösungen eines Körpers in demselben Lösungsmittel mögen die Konzentrationen c_1 und c_2 besitzen. Die Helligkeit des auf beiden Lösungen fallenden Lichtes sei J, nach Durchlaufen der Lösungen sei die Helligkeit J_1 und J_2. Bezeichnet man mit D_1 und D_2 den Durchlässigkeitsfaktor, d. h. diejenige Zahl, mit welcher die Größe J der eintretenden Lichtmenge multipliziert werden muß, um die Helligkeit zu finden, welche das Licht nach Durchlaufen einer Schichthöhe von der Größe der Längeneinheit besitzt, und berücksichtigt man das von Bouguer und Lambert aufgestellte Gesetz, daß jede gleich dicke Schicht einer absorbierenden Substanz immer denselben Bruchteil des auf sie treffenden Lichtes absorbiert, so hat man die Beziehungen

$$J_1 = J . D_1^{h_1}$$
$$J_2 = J . D_2^{h_2}$$

wobei unter h_1 und h_2 die Höhen der durch laufenen Flüssigkeit zu verstehen sind.

Sind die Flüssigkeitshöhen so bemessen, daß die übrigbleibenden Lichtmengen J_1 und J_2 einander gleich sind, so muß

$$D_1^{h_1} = D_2^{h_2}$$

sein.

Nun soll gewöhnlich nicht der Durchlässigkeitsfaktor einer Lösung, sondern ihre Konzentration festgestellt werden. Dazu verhilft die Überlegung, daß das Vermögen eines Körpers, Licht zu absorbieren, eine Folge der spezifischen Eigenschaft seiner Molekel ist, die Lichtstrahlen in bestimmter Menge infolge der eigenen Molekularbewegung zurückzuhalten. Je mehr lichtabsorbierende

Molekel die Lichtbewegung zu durchlaufen hat, eine je konzentriertere Lösung man anwendet, um so größer muß der Lichtverlust sein, um so größer ist die lichtabsorbierende Kraft der Flüssigkeit, um so kleiner also die Lichtdurchlässigkeit bei gleicher Schichtenhöhe.

Man kann demgemäß die Anzahl der in der Längeneinheit befindlichen Schichten einzelner lichtabsorbierender Molekel der Größe der Konzentration proportional setzen. Ist der Durchlässigkeitsfaktor für jede dieser Schichten δ, so ist nach Durchlaufen der Flüssigkeitsschichten die übrigbleibende Lichtmenge für die beiden betrachteten Lösungen (Beersches Gesetz):

$$J_1 = J.\delta^{c_1}$$
$$J_2 = J.\delta^{c_2}$$

Im Zusammenhalt mit der oben abgeleiteten Abhängigkeit der Größen J_1 und J_2 von den Durchlässigkeitsfaktoren D_1 und D_2 ergibt sich also

$$D_1 = \delta^{c_1}$$
$$D_2 = \delta^{c_2}$$

Für den Fall, daß die übrigbleibenden Lichtmengen bei den beiden Lösungen die gleichen sind, war

$$D_1^{h_1} = D_2^{h_2}$$

dafür kann man jetzt setzen

$$\delta^{c_1 h_1} = \delta^{c_2 h_2}$$

so daß also

$$c_1 h_1 = c_2 h_2 \quad \text{ist.}$$

Es sind demnach bei Bemessung der Flüssigkeitshöhen auf die gleiche übrigbleibende Lichtstärke die Konzentrationen der beiden miteinander verglichenen Lösungen eines und desselben Körpers in demselben Lösungsmittel umgekehrt proportional der Länge der von den Lichtstrahlen durchlaufenen Flüssigkeitsschichten. Diese Sachlage geht auch aus der einfachen Ueberlegung hervor, daß nur dann der gleiche Lichtverlust entstehen kann, wenn die gleiche Zahl der lichtabsorbierenden Molekeln von den Lichtstrahlen getroffen wird; dazu ist aber eine um so größere Schichtendicke erforderlich, je geringer die Konzentration der Lösung ist. Kennt man also die Konzentration c_1 der einen Lösung und ermittelt durch Einstellung auf gleiche übrigbleibende Lichtstärke die zugehörigen Schichthöhen h_1 und h_2, so kann man die Konzentration der zweiten Lösung aus der Formel

$$c_2 = c_1 \frac{h_1}{h_2}$$

berechnen.

Bei den bisher gegebenen Betrachtungen ist nicht berücksichtigt worden, daß die gefärbten Lösungen eine auswählende Absorption besitzen, als deren Ergebnis gerade die Farbe der Lösungen auftritt. Sie besitzen also für Strahlen verschiedener Wellenlängen eine verschiedene Durchlässigkeit. Es müßte also eigentlich an Stelle der gegebenen einfachen Beziehungen für die übrigbleibende Lichtstärke der Ausdruck treten

$$J_1 = J_{\lambda_1} D_{\lambda_1}^{h_1} + J_{\lambda_2} D_{\lambda_2}^{h_1} + J_{\lambda_3} D_{\lambda_3}^{h_1} + \ldots\ldots$$

Trotzdem sind die entwickelten einfachen Formeln für gefärbte Lösungen vollkommen zutreffend, da sie auf der Voraussetzung beruhen, daß auf gleiche übrigbleibende Lichtstärke eingestellt werde, daß also der Lichtverlust in den beiden verschieden hohen Flüssigkeitsschichten derselbe, also auch die Anzahl der lichtabsorbierenden Molekel, auf welche die Lichtstrahlen treffen, dieselbe ist. Es wird dann in den übrigbleibenden Lichtmengen bei beiden Lösungen der Anteil von Strahlen verschiedener Wellenlängen derselbe, also bei beiden nicht nur die gleiche Helligkeit, sondern auch dieselbe Mischfarbe vorhanden sein.

Wenn in obigem stets von gefärbten Lösungen gesprochen wurde, so gilt das gleiche auch von lichtdurchlässigen festen Körpern.

3. Extinktionskoeffizient und Absorptionsverhältnis. Bei den bisherigen Betrachtungen war vorausgesetzt, daß die Lösung, deren Konzentration bestimmt werden sollte, mit einer Normallösung von bekanntem Gehalt verglichen werde.

Um die Berechnung der Konzentration zu vereinfachen, führten Bunsen und Roscoe bei ihren photochemischen Versuchen an Gasen den Begriff des Extinktionskoeffizienten ein. Sie definierten diesen als den reziproken Wert derjenigen Schichtendicke, welche eine Substanz haben muß, um das auf sie fallende Licht bis auf $^1/_{10}$ der Intensität des auffallenden Lichtes durch Absorption abschwächen zu können.

Setzt man die ursprüngliche Lichtstärke J gleich der Einheit, so ist die übrigbleibende Lichtstärke

$$J_1 = D^{h_1}$$

also

$$\lg J_1 = h_1 \lg D$$

Setzt man, um den Extinktionskoeffizienten e einzuführen

$$h = \frac{1}{e} \text{ und } J_1 = \frac{1}{10},$$

so ist

$$e = -\lg D_1$$

Da nun aber auch

$$\lg D = \frac{\lg J_1}{h_1} \text{ ist}$$

so kann man setzen

$$e = -\frac{\lg J_1}{h_1}$$

und wenn man übereinkommt, stets mit Schichten von der Dicke $h_1 = 1$ (z. B. 1 cm) zu arbeiten, so ist

$$e = -\lg J_1$$

d. h. der Extinktionskoeffizient ist gleich dem negativen Logarithmus der übrigbleibenden Lichtstärke.

Da nun nach den bisherigen Ausführungen die Dicke, welche eine Lösung haben muß, um die Lichtstärke auf $^1/_{10}$ herunter zu bringen, um so kleiner ist, je stärker die Konzentration c der Lösung ist, und da der Extinktionskoeffizient als reziproker Wert dieser Dicke definiert wurde, so ist der Extinktionskoeffizient um so größer, je stärker die Konzentration ist; der Extinktionskoeffizient e und die Konzentration c sind einander proportional.

Für zwei Lösungen derselben Substanz mit den Konzentrationen c_1 und c_2 und den Extinktionskoeffizienten e_1 und e_2 besteht also die Beziehung

$$\frac{c_1}{e_1} = \frac{c_2}{e_2} = A$$

d. h. das Verhältnis der Konzentration zum Extinktionskoeffizienten ist eine Konstante. A. Vierordt nannte dieses Verhältnis das Absorptionsverhältnis. Auf seiner Bestimmung beruht die ganze quantitative Spektralanalyse. Wenn man von einer Lösung mit bekannter Konzentration c_1 auf optischem Wege e_1 bestimmt hat, so ist A für die betreffende Substanz in bezug auf die benutzte Spektralregion gefunden und man kann bei einer Lösung von unbekannter Konzentration c_2 durch optische Bestimmung von e_2 die Größe c_2 berechnen aus der Gleichung

$$c_2 = A . e_2$$

Ist also A ein für allemal bekannt als eine spezifische Eigenschaft des in Betracht kommenden Körpers, so braucht man keine Normallösung zum Vergleich heranzuziehen, sondern man erlangt die Kenntnis der Konzentration der untersuchten Lösung durch Bestimmung derjenigen Schichtendicke, durch welche eine Schwächung des Lichtes auf $^1/_{10}$ seines ursprünglichen Wertes bewirkt wird, d. h. des Extinktionskoeffizienten, welcher gleich dem negativen Logarithmus des übrigbleibenden Lichtes ist.

4. Die Praxis der quantitativen Spektralanalyse. Es handelt sich also bei der quantitativen Spektralanalyse um Messung der Lichtstärke in abgegrenzten Spektralbezirken, die Aufgabe ist also eine photometrische; deshalb sind die dazu dienenden Apparate in dem Artikel „Photometrie“ in Bd. VII S. 775ff. beschrieben. Es seien deshalb hier nur einige Winke für die praktische Anwendung der Methode gegeben.

Bei allen Spektralapparaten zur quantitativen Analyse werden zwei Spektren erzeugt, die unmittelbar aneinander grenzen. Das eine Spektrum stammt von der Lichtquelle, das andere ist das Absorptionsspektrum der zu untersuchenden Substanz. In meßbarer Weise wird Helligkeitsgleichheit in beiden hergestellt (Bestimmung von $e = -\lg J_1$).

Wendet man den Vierordtschen Doppelspalt dazu an, so ist es zu empfehlen, einen sich symmetrisch zur optischen Achse öffnenden Spalt zur Vermeidung gewisser dieser Methode anhaftenden Fehler zu benutzen, sowie möglichst nicht sehr voneinander verschiedene Helligkeiten in den beiden Spektren herzustellen, damit die beiden Spalte nicht sehr verschieden weit geöffnet werden müssen. Man erreicht das einerseits durch passende Wahl der Konzentration der Lösung, andererseits, wenn erforderlich, durch Einschalten von zweckentsprechenden Rauchgläsern.

Da die Spaltbreiten als Maß für die Helligkeit dienen, ist selbstverständlich darauf zu achten, daß die Nullstellung der Trommeln auf der die Spalte öffnenden Mikrometerschraube dem vollkommenen Schluß der Spalte entspricht.

Die Beleuchtung des Doppelspaltes muß so sein, daß ohne vorgesetzte Flüssigkeit die beiden Spektren gleich hell sind. Bei vorgesetzter Flüssigkeit muß die Flüssigkeitsoberfläche genau vor der Grenze zwischen den beiden Spalten stehen. Das ist wegen des Meniskus an den Wänden des Glastroges nicht zu erreichen, derselbe wird als störender Streifen zwischen den beiden Spektren erscheinen.

Aus diesem Grunde erfuhr die Vierordtsche Methode eine wesentliche Verbesserung durch Einführung des Schulzschen Glaskörpers (Fig. 1). In das Absorptionsgefäß wird ein würfelförmiger Glaskörper a gelegt, dessen obere Fläche scharf abgeschliffen ist. Haben die Wände des Glastroges eine Entfernung von 11 mm voneinander, und hat der Glaskörper eine Dicke von 10 mm, so wird bei gefülltem Gefäße das Licht in der unteren Hälfte eine Flüssigkeitsschicht von 1 mm, in der oberen eine solche von 11 mm zu durchleuchten haben. Die auf die obere Spalthälfte fallende

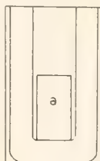


Fig. 1.

Lichtmenge ist also durch eine Flüssigkeitsschicht von 1 cm mehr geschwächt als die untere. Das Gefäß muß natürlich so aufgestellt werden, daß die Oberfläche des Glaswürfels in der optischen Achse steht und als gerade Linie, nicht als Fläche erscheint.

Bei anderen Spektrophotometern, wie denjenigen von Glan, Hüfner, König-Martens usw. findet die meßbare Lichtschwächung durch polarisierende Mittel statt. Hier ist nur ein einfacher Spalt vorhanden, aber auch hier soll die Grenze zwischen den beiden Spektren eine möglichst feine Linie sein. Wo das nicht wie bei König-Martens durch Anwendung eines Zwillingsprismas erreicht wird, tut man gut, das von G. Hüfner angegebene Reflexionsprisma zwischen Spalt und Absorptionsgefäß einzuschalten (Fig. 2).

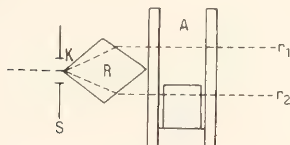


Fig. 2.

Der Glaskörper R hat eine rhombische Form und wird mit seiner einen scharfen horizontalen Kante k in unmittelbare Berührung mit dem Spalt S gebracht, so daß sie im Beobachtungsfernrohre des Spektralapparates als feine Linie gleichzeitig mit den Spalträndern scharf eingestellt ist. Die von der Lichtquelle kommenden Strahlen durchlaufen das Absorptionsgefäß A und das Reflexionsprisma R in folgender Weise. Das obere Bündel r_1 wird an der Eintritts- und an der Austrittsfläche des Reflexionsprismas so gebrochen, daß seine obere Grenze an der Kante k auf die Mitte des Spaltes S austritt, während es bei dem unteren Bündel r_2 umgekehrt ist.

Eine andere Methode zur Erreichung desselben Zweckes rührt von P. Schottländer her. Durch Benutzung zweier Kollimatorobjektive mit parallelen optischen Achsen werden zwei voneinander getrennte Teile des Spaltes so im Beobachtungsfernrohre abgebildet, daß die von ihnen herrührenden Spektren in einer ideellen Linie zusammenstoßen, die bei Helligkeitsgleichheit vollkommen verschwindet.

Um dem Auge eine ruhige und ungestörte Beobachtung und Messung der Lichtabsorption an einer bestimmten Stelle des Spektrums zu ermöglichen, muß das übrige Spektrum zu beiden Seiten dieses Streifens vollständig abgeblendet werden. Man bringt zu diesem Zwecke nach dem Vorgange von Vierordt in der Gesichtsfeldebene einen Okularspalt an, der möglichst symmetrisch zur optischen Achse verbreitert oder verengert werden kann. Die wirksame Oeffnung des Okularspaltes soll so gewählt werden, daß ein möglichst homogen gefärbter Spektralbezirk in ihr enthalten ist, jedoch verhindert eine zu große Verschmälerung die Möglichkeit einer genaueren Vergleichung der Helligkeiten.

Zur Ausführung der Messung kommen selbstverständlich diejenigen Stellen des Spektrums in Betracht, an welchen sich die für den zu untersuchenden Stoff charakteristischen Absorptionsstreifen befinden. Hier nimmt die Lichtabsorption mit der Konzentration der Lösung schneller zu als in anderen Regionen des Spektrums, hier erreicht also die Methode der quantitativen Spektralanalyse ihre größte Empfindlichkeit.

Die Konzentration einer Lösung ist bei der Bestimmung ihres Extinktionskoeffizienten möglichst nicht zu stark abweichend von derjenigen Konzentration zu wählen, bei welcher das Absorptionsverhältnis $A = \frac{c}{e}$ bestimmt ist. Denn das Gesetz, nach welchem die Extinktionskoeffizienten von Auflösungen eines gefärbten Körpers sich wie die Konzentrationen der Lösungen verhalten, besitzt nicht die allgemeine Gültigkeit, welche ältere Forscher wie Beer, Bunsen und Roscoe, Zöllner, Melde, Glan, Vierordt ihm zuschreiben. Das haben eingehende Untersuchungen mit den inzwischen vervollkommneten instrumentellen Hilfsmitteln erwiesen, das folgt aber auch aus der Lösungstheorie, nach welcher bei Auflösung eines Stoffes häufig Solvatbildung, elektrolytische Dissoziation, Umlagerung und andere Vorgänge stattfinden, welche eine Aenderung der spektralen Absorption zur Folge haben können. Ferner gelten für colloide Lösungen die im Abschnitt 2 angestellten Ueberlegungen nicht ohne weiteres. Daher kann das Beersche Gesetz, nach dem die Schichtdicke proportional der Lichtabsorption sein soll, nicht allgemeine Gültigkeit beanspruchen. Man vergleiche die Artikel „Lösungen", „Absorption", „Hydrate", „Disperse Systeme".

Um möglichst zuverlässige Ergebnisse bei der quantitativen Spektralanalyse zu erhalten, ist es nach dem Gesagten erforderlich, in einen bestimmten Spektralbezirk für die Lösungen einer gefärbten Verbindung bei etwa 4 bis 5 verschiedenen Konzentrationen, welche in 1 cm dicker Schicht für Licht-

schwächungsmessungen möglichst geeignet sind, die Größe $A = \frac{c}{e}$ zu ermitteln. Daraus wird erkennbar, ob das A für die betreffenden Konzentrationen konstant ist, oder ob zur genaueren Konstruktion der Kurve, welche die Abhängigkeit des A von dem beobachteten Extinktionskoeffizienten darstellt, noch weitere Bestimmungen des Absorptionsverhältnisses bei anderen Konzentrationen erforderlich sind.

Da Lösungen gefärbter Körper bei verschiedenen Temperaturen eine Veränderung der Lage der Absorptionsstreifen zu zeigen pflegen, bei einigen sich sogar die Gesamtfarbe ändert, so sind quantitativ spektralanalytische Messungen stets bei derselben Temperatur, am besten bei Zimmertemperatur vorzunehmen. Man muß also etwa erwärmte Lösungen abkühlen lassen, bevor man sie untersucht.

5. Anwendungen der quantitativen Spektralanalyse. Der geschilderten Methode zugänglich sind alle gefärbten Lösungen, welche ein ausgeprägtes Absorptionsspektrum besitzen. Für viele derselben ist in der Fachliteratur die Größe des Absorptionsverhältnisses vorhanden. Die angegebenen Werte beziehen sich immer auf bestimmte dabei ausdrücklich angegebene Spektralbezirke. Es ist deshalb bei den Messungen darauf zu achten, daß gerade diese Bezirke benutzt werden.

Wo das Absorptionsverhältnis noch nicht bekannt ist, läßt es sich leicht in der geschilderten Weise unter Benutzung einer Lösung mit bekannter Konzentration ein für allemal bestimmen.

Als Beispiele von zur quantitativen Spektralanalyse sehr geeigneten Stoffen seien Kaliumpermanganat, Kaliummonochromat und -dichromat, Chromalaun und andere angeführt. Die Bestimmung minimaler Mengen von Kupfer gelingt in der Form des Cuprammoniumsulfates. Dieselbe Methode leistet nützliche Dienste bei der Bestimmung der entfärbenden Kraft der Knochenkohle, zur Wertbestimmung des Indigos wie bei der Untersuchung einer großen Anzahl technischer Farbstoffe. Auch in der physiologischen Chemie, hauptsächlich bei der Untersuchung der Blutfarbstoffe und der Harnfarbstoffe, wird die quantitative Spektralanalyse vielfach angewandt.

6. Die Kolorimeter. Ein bedeutend einfacheres Untersuchungsverfahren gestatten die Kolorimeter, bei denen auf die Zerlegung des Lichtes in ein Spektrum und die Messung in einem bestimmten Spektralbezirk verzichtet wird und die Gesamtfarbe der Untersuchung zugrunde gelegt wird. Die sämtlichen diesem Zwecke dienenden Apparate müssen gestatten, die Höhe der von dem Lichte durchlaufenen Flüssigkeitsschicht in weiten Grenzen zu verändern, und die übrigbleibende Lichtstärke derjenigen in der Vergleichslösung gleichmachen zu können. Diese Apparate bestehen also im wesentlichen aus zwei Teilen, nämlich den die Flüssigkeit enthaltenden Mensuren und einer optischen Vorrichtung, welche bewirkt, daß die beiden einander gleich zu machenden übrigbleibenden Lichtstärken unmittelbar benachbart zueinander in dem Gesichtsfelde eines Beobachtungsrohres erscheinen. Je nach der Verschiedenheit der diesen beiden Aufgaben dienenden Anordnungen ergeben sich verschiedene Konstruktionen des Gesamtapparates.

Das von C. H. Wolff konstruierte Kolorimeter (Fig. 3) besitzt einen auf dem Fuß befestigten Beleuchtungsspiegel, welcher das Licht des bewölkten Himmels oder einer Lichtquelle durch zwei Glaszylinder mit seitlichen Abflußhähnen leitet. Die beiden Mensuren sind in ihrer Höhe in 100 Teile geteilt. Die Zylinder sind mittels einer Messingsfassung unten durch planparallele Glasplatten verschlossen, welche zum Zwecke der Reinigung der Zylinder leicht entfernt werden können.

Senkrecht über den beiden Zylindern befinden sich zwei Glasprismen D (Fig. 4). Diese führen die beiden aus den Zylindern kommenden Strahlenbündel durch zweimalige Reflexion zur unmittelbaren Berührung. Sie werden mittels eines kleinen Fernrohres E beobachtet und man erhält im Gesichtsfelde einen Kreis, dessen eine Hälfte Licht durch den einen Flüssigkeitszylinder, dessen andere solches durch den anderen Zylinder von dem unter ihnen befindlichen Beleuchtungsspiegel zugesandt erhält.

Die Flüssigkeitshöhen werden bei diesem Apparat durch Benutzung der seitlichen Abflußhähne so eingestellt, daß beiderseits im Gesichtsfeld gleiche Helligkeit herrscht. Hierbei wird man, um eine möglichst einfache Rechnung zu haben, den einen der beiden Zylinder, und zwar denjenigen, welcher die am wenigsten konzentrierte Lösung, also die hellere, enthält, bis zur Marke 100 gefüllt lassen und die Höhe der Flüssigkeit in dem anderen so weit verringern, bis gleiche Absorption von beiden Flüssigkeitssäulen ausgeübt wird. Diese Einstellung läßt sich nach kurzer Uebung leicht bewirken.

Zwischen die Augenortsblende und die obere Okularlinse kann noch ein Rauchglas eingeschaltet werden. Es empfiehlt sich, abwechselnd mit und ohne Rauchglas zu be-

obachten, je nach der Intensität des Lichtes oder der mehr oder minder starken Färbung der Flüssigkeiten. Das Auge nimmt bei Beobachtung mit Rauchglas oft noch kleine Unterschiede in den Farbentönen wahr, welche ihm bei stärkerer Helligkeit entgehen.

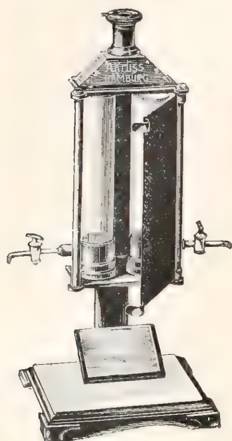


Fig. 3.

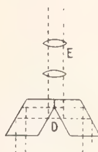


Fig. 4.

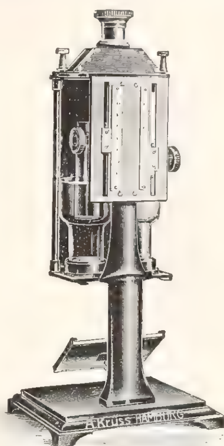


Fig. 5.

Das Kolorimeter nach Duboscq (auch nach Laurent genannt) unterscheidet sich von dem Wolffschen nur durch die Einrichtung zur Veränderung der Flüssigkeitshöhen. Hier sind die Flüssigkeiten in zwei unten mit Glasplatten verschlossenen Glasgefäßen enthalten (Fig. 5). Um die Höhen der Flüssigkeitsschichten, welche das Licht durchstrahlen soll, verändern zu können, sind zwei oben offene, unten ebenfalls durch Glasplatten verschlossene Tauchröhren vorhanden, welche in die Gefäße mehr oder weniger eingesenkt werden können: Zu diesem Zwecke sind die horizontalen Träger der beiden Tauchröhren in senkrechten Schlitzen des Statives verschiebbar. Die Verschiebung geschieht mittels Zahn und Trieb durch Handhabung von seitlich angebrachten Knöpfen. Eine an den Schlitzen angebrachte Teilung erlaubt, die Höhe der Flüssigkeitsschichten zu messen, welche sich zwischen dem Boden des Tauchrohres und dem Boden des Glasgefäßes befindet, welche also auf das hindurchgesandte Licht absorbierend wirkt.

Um eine kolorimetrische Beobachtung zu machen, stellt man durch Drehen des Beleuchtungsspiegels, der Lichtquelle oder des ganzen Instrumentes gleiche Helligkeit in den beiden Hälften des Gesichtsfeldes her. Dabei müssen die Gefäße leer und gut gereinigt sein. Sodann gibt man in eines der Gefäße die Normallösung mit bekanntem Gehalt, in das andere die Lösung, deren Gehalt bestimmt werden soll. Dasjenige Tauchrohr, welches sich in der Normallösung befindet, wird in eine bestimmte Höhe eingestellt und hierauf das andere Tauchrohr in eine solche Höhe gebracht, daß die beiden Hälften des Gesichtsfeldes wieder gleiche Helligkeit zeigen. Man liest an den beiden Teilungen die Höhen der Flüssigkeitssäulen ab; das umgekehrte Verhältnis dieser Höhen, welche gleiche Absorption ausüben, ergibt das Verhältnis der in den beiden Flüssigkeiten enthaltenen Mengen an färbender Substanz, woraus sich der Farbstoffgehalt der untersuchten Lösung ohne weiteres berechnet.

Eine sehr ähnliche Einrichtung hat das Farbenmaß nach Stammer (Fig. 6), bei welchem für gewisse technische Zwecke, wie zur Bierfarbebestimmung, zu Erdöluntersuchungen usw. nur ein einziger Flüssigkeitsbehälter mit Tauchrohr verwendet wird, in welchen die zu untersuchende Flüssigkeit kommt. Anstatt der Normallösung wird ein der zu untersuchenden Lösung entsprechend gefärbtes Glas benutzt, doch kann der Farbenton des Glases, welches zum Vergleich dienen soll, nicht für alle Fälle gleich gut getroffen werden, weil z. B. die verschiedenen Erdölarten voneinander ab-

weichende Färbungen besitzen. Ein weiterer Unterschied zwischen den Apparaten von Duboscq und von Stammer besteht darin, daß bei letzterem das Tauchrohr fest, der Behälter mit der Flüssigkeit dagegen durch eine Windenvorrichtung gehoben oder gesenkt werden kann, also gerade umgekehrt wie bei Duboscq.

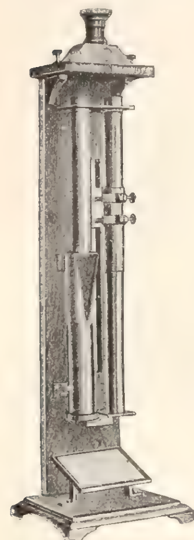


Fig. 6.

Um die notwendige Veränderung der Flüssigkeitshöhen und die dafür erforderlichen Rohre, Abflußhähne usw. zu vermeiden, hat Gallenkamp ein Kolorimeter konstruiert, in welchen zwei oben gleich weite, aus Spiegelglasplatten gebildete Tröge senkrecht nebeneinander aufgestellt sind. Der eine Trog hat eine parallelepipedische Form, während der andere nach unten keilförmig zuläuft. Die zu untersuchende Flüssigkeit wird in das parallelepipedische, die Normalflüssigkeit in das keilförmige Gefäß gebracht. In dem letzteren nimmt die Farbe der Normallösung von der tiefsten Färbung bis zur Farblosigkeit allmählich ab, wenn man durch den Trog auf einen dahinter gestellten gleichmäßig erleuchteten weißen Schirm blickt. Vor den Trögen ist der auch bei den Kolorimetern von Wolff und Duboscq angewandte optische Apparat mit Fresnelschen Prismen an einer Skala in der Höhe verschiebbar. Er wird auf eine solche Höhe eingestellt, daß beide Hälften des Gesichtsfeldes gleich hell erscheinen. Neben manchen Vorzügen hat dieses Instrument den einen Uebelstand, daß die dem keilförmigen Trog entsprechende Hälfte des Gesichtsfeldes selbstverständlich nicht gleichmäßig beleuchtet, sondern stets oben dunkler ist als unten. Man wird bei der Einstellung also sein Augenmerk besonders darauf richten müssen, daß die Helligkeitsgleichheit gerade für die Mitte des Gesichtsfeldes hergestellt ist.

Ganz abweichend von den bisher beschriebenen Apparaten ist das von G. Steiger konstruierte Kolorimeter. Die von dem unteren Beleuchtungsspiegel senkrecht nach oben geworfenen Strahlen treffen unter 45° auf zwei nebeneinander stehende feste Spiegel. Diese tauchen in zwei oben offene längliche Glaswannen, die mit den beiden, miteinander zu vergleichenden Lösungen gefüllt werden. Das Ende dieser Glaswannen kann in ihrer Längsrichtung in meßbarer Weise verschoben werden, so daß zwischen den in sie eintauchenden Spiegel und die kurze Vorderfläche verschieden lange Schichten der lichtabsorbierenden Lösung gebracht werden können. Die Beobachtung geschieht nur von der Vorderfläche der Glaswannen aus und die beiden Glaswannen werden so gegeneinander verschoben, daß an den beiden Vorderflächen die gleiche Lichtstärke beobachtet wird.

Verbesserungen der bisher beschriebenen Kolorimeter haben sich wesentlich auf die optische Vorrichtung gerichtet, durch welche das durch die beiden Lösungen kommende Licht in einem einzigen Gesichtsfelde vereinigt wird. Es handelt sich hier hauptsächlich darum, daß die wenn auch nicht sehr breite Trennungslinie der beiden Fresnelschen Prismen störend wirkt. So fein und scharf man auch die betreffenden Kanten der beiden Prismen zu machen bestrebt ist, es wird in Wirklichkeit diese Kante keine mathematische Linie, sondern eine schmale Fläche sein.

Eine Verbesserung stellt jedenfalls eine von F. G. Donnan angegebene Vorrichtung dar (Fig. 7). Das durch die mit den Lösungen gefüllten Zylinder hindurchtretende Licht fällt auf zwei Spiegel, welche im Winkel von 45° zur Senkrechten stehen, und von dort in das Beobachtungsrohr. Von demjenigen Spiegel, welcher dem Auge des Beobachters am nächsten steht, ist ein Teil der Silberbelegung in Form eines elliptischen Ringes entfernt und durch diesen kommt das Licht, welches von dem hinteren Spiegel reflektiert wird, während derjenige Teil des vorderen Spiegels, von dem die Folie nicht

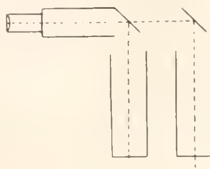


Fig. 7.

entfernt ist, das Licht aus der unter ihm befindlichen Lösung reflektiert. Demnach

sieht der Beobachter, wenn er in das Okular blickt, einen kreisförmigen Ring, welcher sich in einem ebenfalls kreisförmigen Hintergrund befindet; die beiden Felder, welche miteinander verglichen werden sollen, grenzen also unmittelbar aneinander, wodurch die Einstellung auf Gleichheit sehr erleichtert wird.

In noch vollkommenerer Weise wird dieses erreicht, wenn man sich des von Lummer und Brodhun in die Photometrie eingeführten Prinzips bedient (vgl. den Artikel „Photometrie" Bd. VII S. 769).

Die Anordnung eines derartigen Kolorimeteraufsatzes von Krüß ist aus Fig. 8 ersichtlich.

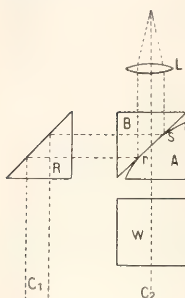


Fig. 8.

Hier sind B und A die beiden das Lummer-Brodhunsche Prismenpaar bildenden rechtwinkeligen Prismen, welche in der Mittelfläche rs der Hypotenusen in engster Berührung miteinander sind. Hier wird also das aus dem Kolorimeterzylinder C_2 kommende Licht hindurchtreten, während die äußeren Teile der Hypotenusenfläche des Prismas B das in senkrechter Richtung dazu eintretende Licht reflektieren, welches unter Mitwirkung des Reflexionsprismas R aus dem Kolorimeterzylinder C_1 stammt. Zum Ausgleich des Lichtverlustes in dem Reflexionsprisma R dient der unter dem Lummer-Brodhunschen Prismenpaar angebrachte Glaswürfel W; in diesem haben die Strahlen genau die gleiche Weglänge wie in dem Prisma R.

Auch J. Plesch benutzt das Lummer-Brodhunsche Prismenpaar in seinem Chromophotometer, dessen weitere Anordnung des optischen Teiles dem Schema von Donnan entspricht.

Hier muß auch noch des von J. König angegebenen Diaphanometers gedacht werden, welches zur Bestimmung des Trübungsgrades, vor allem des Wassers, erdacht wurde. Es ist im wesentlichen ein Duboscqsches Kolorimeter mit optischem Aufsatz unter Verwendung des Lummer-Brodhunschen Prismenpaares. Hier kann aber nicht eine Normalflüssigkeit oder ein Vergleichsglas benutzt und auf diese die Lichtabsorption bezogen werden, sondern dieses Instrument gestattet unmittelbar die ziffernmäßige Feststellung der Lichtdurchlässigkeit der untersuchten Flüssigkeit. Dies wird ermöglicht durch Zwischenschaltung genau nach ihrer Lichtdurchlässigkeit kalibrierter Rauchgläser, während die Veränderung der Flüssigkeitshöhe nur die Zwischenstufen zwischen den einzelnen Rauchgläsern herstellt.

Eine andere Art stellt das Polarisationskolorimeter nach Krüß dar, indem hier nicht eine Veränderung der Schichtdicken zur Lichtmessung erforderlich ist, sondern nur als angenehmes sekundäres Hilfsmittel dient, während zur eigentlichen Einstellung auf Helligkeitsgleichheit polarisierende Mittel benutzt werden.

Die Kolorimeterzylinder A und B sowie der Spiegel C (Fig. 9) sind genau so ange-

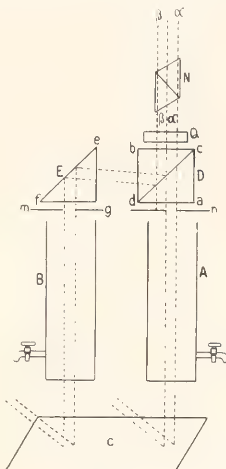


Fig. 9.

ordnet wie bei dem Wolffschen Kolorimeter, nur tut man gut, als reflektierende Fläche entweder eine matte Glasscheibe zu benutzen oder ein Stück weißen Papieres, da bei der Spiegelung an einer Glasfläche die Lichtstrahlen bereits teilweise polarisiert werden würden. An Stelle der Reflexionsprismen aus Glas befindet sich hier oberhalb der Kolorimeterzylinder die von W. Große angegebene Kombination aus Kalkspatprismen. Das über dem Zylinder A befindliche Kalkspatprisma D ist ein sogenanntes

Glansches Luftprisma, dessen beide Hälften in der Schnittlinie cd wieder aneinander gefügt sind. Nur sind hier nicht wie sonst nur die Ein- und Austrittsflächen ad und cb poliert, sondern auch die eine Seitenfläche bd. Durch eine vorgesetzte Blende n wird bewirkt, daß nur ein schmales, aus dem Zylinder A kommendes Lichtbündel das Prisma D durchsetzt. In diesem Lichtbündel werden an der Schnittfläche cd die ordentlichen Strahlen total reflektiert, so daß nur die außerordentlichen in dem austretenden Bündel α enthalten sind.

Ueber dem zweiten Zylinder B befindet sich ein halbes Kalkspatprisma E von demselben Winkel wie das Prisma D. Die drei Flächen desselben fg, fe und eg sind poliert. Die durch die Blende m in dieses Prisma eintretenden Strahlen erleiden an der Fläche ef eine Polarisation, indem die ordentlichen Strahlen total reflektiert werden, während die außerordentlichen Strahlen durch das Prisma hindurchgehen. Das reflektierte Bündel ordentlicher Strahlen wird an der Fläche cd des Prismas D nochmals reflektiert und tritt sodann unmittelbar neben dem Bündel α als Bündel β aus.

In den Gang der Strahlenbündel α und β ist dann eine Quarzdoppelplatte Q von 3,75 mm Dicke eingeschaltet; dieselbe besteht in der einen Hälfte aus rechts drehendem, in der anderen aus links drehendem Quarz und ist so angebracht, daß die Trennungslinie dieser beiden Hälften senkrecht zu der Trennungslinie zwischen den beiden Strahlenbündeln α und β steht. Dadurch wird das ganze Gesichtsfeld in vier quadratische Felder α_l und α_r, β_l und β_r eingeteilt.

Ueber dieser Quarzdoppelplatte Q befindet sich noch ein analysierendes Nicolsches Prisma N; es ist um seine Achse drehbar und seine Stellung kann an einem geteilten Kreise abgelesen werden. Ist das analysierende Nicolsche Prisma N auf 45° eingestellt, so erscheinen die diagonal liegenden Felder nur dann in gleicher Helligkeit und in gleicher Farbe, wenn durch die Lösungen in den beiden Zylindern A und B die gleiche Lichtmenge hindurchtritt. Zu der Beurteilung gleicher Helligkeit tritt also bei dem Polarisationskolorimeter noch die Einstellung auf gleiche Farbe, wodurch die Genauigkeit wesentlich erhöht wird.

7. Anwendungen der Kolorimetrie. Aus dem Anwendungsgebiet der kolorimetrischen Analyse sei nur kurz erwähnt die Bestimmung von Kupfer- und Nickelsalzen, von Kaliummono- und -dichromat, die Ammoniakbestimmung im Trinkwasser, die Bestimmung minimaler Mengen von salpetriger Säure, geringer Mengen von Chlor und Kupfer, sowie Gold, die Bestimmung des Kohlenstoffs im Eisen, der entfärbenden Kraft der Knochenkohle, sowie die Wertbestimmung des Indigos.

Literatur. *Zusammenfassende Werke:* **K. Vierordt,** *Die Anwendung des Spektralapparates zur Photometrie des Absorptionsspektra und zur quantitativen Analyse. Tübingen 1873.* — **Derselbe,** *Die quantitative Spektralanalyse in ihrer Anwendung auf Physiologie, Physik, Chemie und Technologie. Tübingen 1873.* — **C. Gänge,** *Lehrbuch der angewandten Optik in der Chemie. Braunschweig 1886.* — **H. W. Vogel,** *Praktische Spektralanalyse irdischer Stoffe. Berlin 1889.* — **J. Landauer,** *Die Spektralanalyse. Braunschweig 1896.* — **J. Biehringer,** *Optische Untersuchungsmethoden (in Abderhaldens Handbuch der biochemischen Arbeitsmethoden).* — **E. Baur,** *Kurzer Abriß der Spektroskopie und Kolorimetrie. Leipzig 1907.* — **G. und H. Krüss,** *Kolorimetrie und quantitative Spektralanalyse, 2. Aufl. Leipzig 1909.*

H. Krüss.

Spektroskopie.

1. Einleitung. 2. Spektralapparate: a) Konstruktion der Prismenapparate. b) Konstruktion der Gitterapparate. c) Konstruktion der Interferenzapparate. d) Theorie der Spektralapparate. 3. Beobachtungsmethoden, Darstellung der Spektra durch Wellenlängen. 4. Emissions- und Absorptionsspektra. 5. Arten der Spektra. 6. Herstellung der Spektra. 7. Beschreibung der Spektra: a) Kontinuierliche Spektra. b) Streifenspektra. c) Aussehen der Linien, Breite, Feinstruktur, Charakter. d) Absorptionslinien. e) Linien der Bandenspektra. f) Umkehrungen. g) Dispersions- und Diffusionsbanden. h) Intensitätsverteilung in Liniengruppen. i) Andere Eigenschaften von Linien. 8. Konstanz der Spektra, Spektralanalyse. 9. Mehrfache Spektra, Verbindungsspektra. Die Spektra der Elemente und Verbindungen. 10. Veränderlichkeit der Spektra: a) Uebergang der mehrfachen Spektra. b) Veränderliche Liniengruppen. c) Einfluß von Erregungsintensität, Dichte; lange, kurze Linien. d) Einfluß von Schichtdicke, Temperatur. e) Umkehrungserscheinungen. f) Druckverschiebung. g) Dopplereffekt. h) Absorption, Dispersion. i) Magnetooptische Effekte. k) Veränderlichkeit der Feinstruktur. l) Veränderlichkeit der Bandenspektra. 11. Resonanzspektra. 12. Fluoreszenz und Phosphoreszenz. 13. Gesetzmäßigkeiten in Spektren: a) Allgemeine Regeln. b) Linienspektra, Zusammenfassung von Liniengruppen, Serien. c) Beziehungen von Linienserien. Regeln von Kayser-Runge-Rydberg. Kombinationsprinzip nach Ritz. d) Vergleich mit der Erfahrung. Die Seriensysteme der Elemente. e) Andere Gesetzmäßigkeiten in Linienspektren. f) Homologien. g) Bandenspektra. 14. Spektroskopische Theorien. 15) Spektroskopie einiger Lichtquellen der Laboratoriumspraxis: a) Bogen. b) Funken.

c) Flammen. d) Geißlerröhren. 16. Spektroskopie der Himmelskörper. a) Erdatmosphäre, Blitz, Nordlichter, Zodiakallicht. b) Sonnenlicht. c) Spektra der Planeten. d) Meteoriten, Kometen. e) Sternklassen. f) Spezielles über Sternspektra. g) Bewegung im Visionsradius. h) Nebelflecken. i) Raumabsorption. k) Hinweise auf Zusammenhänge.

Vorbemerkung. Bei dem ungeheuren Umfang der spektroskopischen Literatur ist es nicht möglich, auch nur auf die wichtigeren Werke und Spezialarbeiten hinzuweisen. Wo daher im folgenden Namen von Autoren genannt sind, sollen dieselben nur das Nachschlagen in der am Schlusse genannten Literatur erleichtern oder verbreitete Unrichtigkeiten korrigieren.

Desgleichen ist es nicht möglich, durch Abbildungen einen Begriff von der Mannigfaltigkeit der spektroskopischen Erscheinungen zu geben. Es würde hierzu ein ganzer Atlas erforderlich sein. Der Leser sei daher auf die am Schlusse genannten Atlanten verwiesen, in denen man leicht Beispiele zu den im Texte besprochenen Erscheinungen findet.

1. Einleitung. Die Spektroskopie hat sich entwickelt aus der Spektralanalyse. Während diese allein den Zusammenhang der chemischen Natur der strahlenden oder absorbierenden Körper mit der Zusammensetzung der emittierten oder absorbierten Strahlen untersucht, beschäftigt sich die Spektroskopie ganz allgemein mit der Untersuchung der in der Natur vorkommenden oder künstlich hergestellten „Licht"- bezw. „Wärme"-strahlen, ihrer Entstehung, Zusammensetzung und ihren Eigenschaften. Eine strenge Abgrenzung gegen andere Teile der Optik läßt sich nicht begründen und wird in der Literatur lediglich nach dem Herkommen und nach praktischen Gesichtspunkten durchgeführt. So findet man im Handwörterbuch eine Reihe von Artikeln, die entweder ganz oder teilweise Gegenstände behandeln, die in das Gebiet der Spektroskopie übergreifen. Man vgl. die Artikel: „Längenmessung", „Strahlende Aetherenergie", „Strahlung", „Photometrie", „Strahlungsmessung", „Lichtbrechung", „Lichtdispersion", „Lichtfortpflanzung in bewegten Medien", ~~„Interferenz des Lichtes", „Beugung des Lichtes"~~, „Farbe", „Optische Instrumente", „Ultraviolett", „Infrarot", „Strahlungsumformungen", „Lumineszenz", „Fluorescenz", „Thermodynamik der Strahlung", „Elektrooptik", „Magnetooptik", „Physik der Sonne", „Quantitative Spektralanalyse", „Qualitative Spektralanalyse".

So verschiedenartig die Gesichtspunkte der Forschung in den mannigfaltigen hier genannten Zweigen der Physik auch sein mögen, so stimmen doch die spektroskopischen Untersuchungen darin überein, daß am Ende stets eine gegebene Licht- (bezw. Wärme-)Strahlung untersucht wird. Dies kann auf doppeltem Wege geschehen, entweder indem man die Energie mißt, die die betreffende Strahlung mit sich führt, z. B. dadurch, daß man sie durch Absorption in Wärme verwandelt oder daß man sie auf eine lichtelektrisch empfindliche Schicht fallen läßt und unter geeigneten Bedingungen Messungen über die entstehende Wärme im ersten, die Elektronenstrahlung im zweiten Falle ausführt. Oder man kann die gegebene Strahlung zunächst analysieren, d. h. in Bestandteile von einfacheren Eigenschaften zerlegen. Letzteres ist in der Spektroskopie das gewöhnliche Verfahren: Man stellt ein Spektrum der zu untersuchenden Strahlung her. Auf diesen Umstand gründet sich auch die Bezeichnung Spektroskopie.

2. Spektroskopische Apparate. Die zur Herstellung von Spektren dienenden Instrumente führen verschiedene Namen, je nachdem sie mehr zu qualitativen Untersuchungen oder zu Messungen oder zur Registrierung von Spektren dienen sollen. Im ersten Falle nennt man sie Spektroskope, im zweiten Spektrometer, im dritten Spektrographen. Das einfachste Instrument, um eine Auflösung einer Strahlung in einfarbige Strahlen auszuführen, ist ein Prisma mit ebenen oder gekrümmten Flächen. Man kann daher die Prismeninstrumente in eine Klasse für sich nehmen. Ein zweites Mittel zur Analyse unregelmäßiger Wellenbewegungen besteht in der Interferenz einer Anzahl von Strahlenbündeln, die einen konstanten Gangunterschied besitzen. Ueber die Theorie der bei der Interferenz stattfindenden Vorgänge vgl. man den Artikel „Lichtinterferenz". Je nach der Art der Herstellung der interferierenden Strahlen unterscheidet man Gitter (ebene oder konkave), Stufengitter (nach Michelson), Interferometer (nach Michelson oder Perot und Fabry) und Interferenzplatten (nach Lummer und Gehrcke).

2a) Konstruktion der Prismenapparate. Aus der großen Zahl der angegebenen Konstruktionen seien hier einige typische ausgewählt, zunächst für Prismenapparate. In der Praxis werden in der Regel vier Typen benutzt, nämlich: 1. Apparate mit einem Prisma, meist von 60° (Laboratoriumsspektralapparate oder -spektrographen); 2. Apparate mit drei Prismen von etwa 60° (astrophysikalische Spektrographen); 3. festarmige Spektroskope (Spektroskope mit konstanter Ablenkung, darunter auch Spektroskope mit gerader Durchsicht, sowie die Anordnung nach Littrow; 4. Prismenapparate nach Féry. Den Anordnungen 1 bis 3 ist gemeinsam, daß sie außer der abbildenden Linse (Fernrohr, Kameraobjektiv) und dem dispergierenden Teil (Prismen) noch ein Kollimatorrohr mit Spalt besitzen. Bei den Apparaten unter 4 und den Instrumenten der Littrowschen Anordnung fehlt ein Kollimatorrohr.

Neben Kollimatorrohr und Fernrohr findet man bei kleineren Instrumenten vielfach noch ein Skalenrohr, um im Gesichtsfelde eine Skala zur Ablesung der Wellenlängen zu erzeugen und eine Vorrichtung, um das benutzte Prisma im Minimum der Ablenkung zu erhalten. Bei größeren Instrumenten, speziell bei Spektrographen, läßt man jetzt beides fort, da man hier immer mit einer festen Stellung des Prismas arbeitet. An Stelle von Linsen benutzt man, insbesondere im Ultrarot, auch Hohlspiegel. Figur 1 gibt ein Schema eines Apparates mit Skalenrohr und Vorrichtung zur Erhaltung des Minimums der Ablenkung, Figur 2 ein Bild eines festarmigen Spektroskopes (Hilger), Figur 3 ein geradsichtiges Spektroskop mit dreiteiligem Compoundprisma (Amici) (s. weiter unten), Figur 4 ein Prismeninstru-

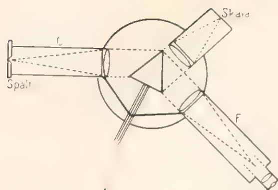


Fig. 1.

graphen mit Prisma nach Féry. Der Kollimator ist in allen Fällen mit C, das Fernrohr oder die Kamera mit F bezeichnet. Die Strahlen deuten den ungefähren Strahlengang an. Einzelheiten der Konstruktion müssen hier übergangen werden.[1] Der Spalt ist am besten symmetrisch beweglich, aus Iridium, für Apparate mit punktweiser Abbildung mit Hartmannscher Spaltblende versehen, um Spektra in unmittelbaren Kontakt bringen zu können. Von der Kollimatorlinse ist zu verlangen, daß sie für Achsenpunkte möglichst vollkommen sphärisch und chromatisch korrigiert sei. Die Kameralinse wird bei Spektrographen am besten gar nicht chromatisch korrigiert, dagegen sphärisch und auf Zonenfehler; sie muß der Sinusbedingung genügen und auf möglichste Bildfeldebnung berechnet sein. Für okulare Beobachtung genügt ein für achsennahe Punkte korrigiertes, chromatisch möglichst vollkommen korrigiertes Objektiv. Für lichtschwache Objekte ist die Brennweite der Linsen möglichst klein zu wählen (Kinematographenobjektive). Zur Vergrößerung kleiner Stücke eines Spektrums bei gegebenem Apparate benutzt man Teleobjektive. Nicht immer kann man die angegebenen Bedingungen einhalten. Unterhalb λ 2800 sind nur noch Quarz,

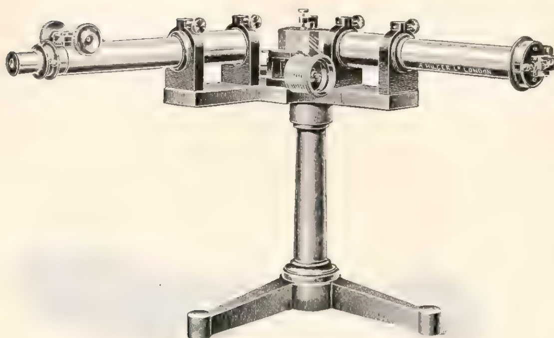


Fig. 2.

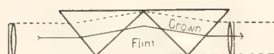


Fig. 3.

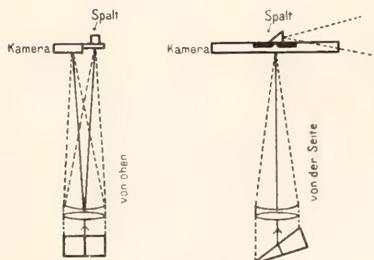


Fig. 4.

ment nach Littrow mit auf der Rückseite vernickeltem (Silber ist im Ultraviolett durchlässig) Halbprisma, Figur 5 das Schema eines Spektro-

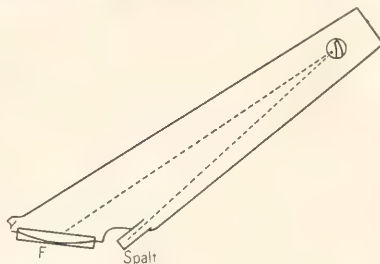


Fig. 5.

[1]) Spektralapparate, Spektrometer und Spektrographen werden in Deutschland besonders gebaut von Fueß-Steglitz, Heele-Berlin, Krüß-Hamburg, Schmidt & Haensch-Berlin, Steinheil-München, Töpfer-Potsdam, Wolz-Bonn, Zeiß-Jena u. a. m., in England von Hilger-London.

Steinsalz und weißer Flußspat, unterhalb λ 1800 nur noch weißer Flußspat durchsichtig (diese Substanzen kommen praktisch allein in Frage). Man ist daher gezwungen, Spektrographen, Linsen und Prismen aus diesen Materialien herzustellen. Der weiße Flußspat kommt seiner Seltenheit wegen wenig in Betracht. Darum werden die meisten Ultraviolettspektrographen mit Quarzlinsen und Quarzprismen ausgestattet. In der Regel benutzt man ein Quarzprisma von 60°, das zur Vermeidung der Doppelbrechung aus zwei Rechts- und Linksquarzen so hergestellt wird, daß in zwei Halbprismen die Achsen auf der einen Kathetenfläche senkrecht stehen (Fig. 6). Auch die Linsen

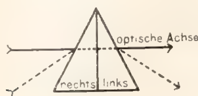


Fig. 6.

müssen mit Rücksicht auf die zirkulare Doppelbrechung hergestellt werden. Man kommt zur Not mit einfachen Linsen aus, falls man kleine Winkelöffnungen anwendet. Bei einer Brennweite von etwa 50 cm ist alsdann die Krümmung der Bildfläche (bei gleichen Linsen) etwa 90 cm, die Neigung der Bildebene gegen die Kollimatorachse etwa 28°, wenn λ 2700 in der Mitte des Bildes und im Minimum der Ablenkung ist. Es befinden sich verschiedene Typen von Quarzspektrographen im Handel[1]), bei denen andere Linsen benutzt werden. Einzelheiten müssen hier fortfallen. Für Untersuchungen unterhalb λ 1800 sind nur Apparate mit Flußspatoptik oder Gittern verwendbar. Dieselben müssen evakuiert oder mit einem Wasserstoff von vermindertem Druck gefüllt werden (V. Schumann, Lyman, vgl. den Artikel „Ultraviolett").

Apparate mit einem Prisma besitzen im Ultraviolett bereits eine sehr erhebliche lineare Dispersion, namentlich, wenn man nicht achromatisierte Linsen verwendet. Im Bereiche längerer Wellen ist dagegen die Dispersion ziemlich klein. Für astrophysikalische Zwecke ist darum ein Spektrographentypus mit drei Prismen in Gebrauch, der speziell für seinen Zweck und die Anforderungen der astronomischen Spektroskopie durchgearbeitet ist. Einzelheiten seien auch hier übergangen.

Bei okularer Beobachtung pflegt man nach und nach verschiedene Teile des Spektrums in die Mitte des Gesichtsfeldes zu bringen, indem man Fernrohr und Prisma, bei festarmigen Instrumenten nur das Prisma bewegt. Dagegen benutzt man Spektrographen ausschließlich mit fester Stellung des Prismas. Wie dieselbe von Fall zu Fall zu wählen ist, läßt sich nicht allgemein angeben.

Die Justierung von Spektralapparaten oder Spektrographen mit einem Prisma erfolgt in der Reihenfolge: Kollimator, Prisma, Kamera. Ist der Kollimator nicht achromatisch, so stellt man ihn für die kürzesten Wellenlängen auf Unendlich.

Unter festarmigen Instrumenten sind solche zu verstehen, bei denen die Achsenrichtung des austretenden Lichtes stets denselben Winkel mit der Richtung des einfallenden Lichtes bildet. Es sind zahlreiche Anordnungen gegeben worden, um diesen für die Praxis häufig wertvollen Strahlengang zu erreichen. Hier seien nur die hauptsächlich benutzten Anordnungen genannt. Bei den Compoundprismen (Amiciprismen, Prismen mit gerader Durchsicht) wird die Geradsichtigkeit dadurch erreicht, daß man (Fig. 3) mehrere Prismen aus verschiedenem Material und von entgegengesetzter Kantenrichtung so miteinander kombiniert, daß für eine mittlere Farbe die Ablenkung aufgehoben wird, während die Dispersion teilweise bestehen bleibt. Man findet diese Anordnung gegenwärtig meist nur bei kleineren Instrumenten für den Handgebrauch. Oder man benutzt ein einziges Prisma, das man sich z. B. aus einem totalreflektierenden und einem Prisma von 60° zusammengesetzt denken kann. Man erhält dann eine konstante mittlere Ablenkung von 90°, und zugleich befindet sich der Strahl, der in die Mitte des Gesichtsfeldes fällt, im Minimum der Ablenkung. Figur 7 stellt

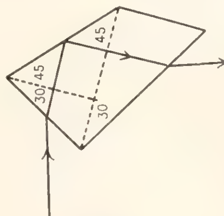


Fig. 7.

eine derartige, in neuerer Zeit namentlich in Apparaten von Hilger viel benutzte Anordnung dar.

Endlich kann man die Geradsichtigkeit dadurch erzielen, daß man die Strahlen auf ihrem eigenen Wege zurückkehren läßt, Man verwendet dann eine Halbierungsfläche eines Prismas als Spiegel (Fig. 4). Ein totalreflektierendes Prisma wirft das Licht auf den Spalt, der sich etwas oberhalb der Achse des Kollimatorrohres befindet. Nach der Rückkehr der Strahlen entsteht ein Spektrum unterhalb der Achse, das mittels Lupe oder photographischer Platte beobachtet wird. Die skizzierte Anordnung, zuerst von Littrow vorgeschlagen, ist weiter von Abbe und von den Astronomen viel benutzt worden. Sie hat den Vorteil, nur ein halbes Prisma und nur eine einzige Linse für Kollimator und Kamera zu erfordern. Letzteres fällt namentlich bei großen Prismen oder Gittern in die Wagschale. Auch hier befindet sich der Mittelstrahl stets im Minimum der Ablenkung.

Nahe verwandt mit der eben beschriebenen Anordnung ist das Prisma von Féry. Bei diesem (Fig. 8) ist die Vorderfläche des Halbprismas

[1]) Besonders gebaut von Fuess-Steglitz, Heele-Berlin, Hilger-London, Steinheil-München, Töpfer-Potsdam, Zeiß-Jena.

konkav, die Rückfläche konvex und spiegelnd (Metallbelag). Ohne Kollimator und Linse entwirft das Prisma ein Spektrum, das auf einem Kreise liegt und zugleich stark astigmatisch ist.

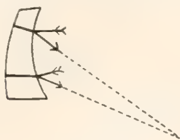


Fig. 8.

Der Vorteil besteht in der Benutzung nur eines einzigen Materialstückes.

Von den zahlreichen sonstigen Prismenkonstruktionen seien hier nur noch die Young-Thollonschen Prismenpaare erwähnt, von denen Figur 9 ein Beispiel gibt. Verbindet man je eines

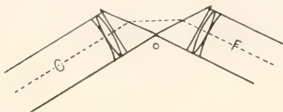


Fig. 9.

der beiden Halbprismen mit dem Kollimator, das andere mit dem Fernrohr, so befindet sich für jeden Winkel zwischen diesen der Mittelstrahl im Minimum der Ablenkung. Die Drehungsachse liegt in o. Die Anordnung hat noch weitere Vorteile, z. B. denjenigen der größeren Lichtstärke.

2b) Konstruktion der Gitterapparate. Praktisch werden nur Plangitter oder Konkav-(Kugel-)Gitter benutzt. Während man im Ultrarot noch vielfach Gitter aus Metalldrähten verwendet (vgl. den Artikel „Infrarot") und für bestimmte Zwecke Gitter aus verschiedenen Metallen herstellt (Wood, Anderson), werden im Bereiche der kürzeren Wellen entweder durchsichtige Gitterkopien oder auf Spiegelmetall geritzte Gitter benutzt. Nur diese letzteren seien hier berücksichtigt. Man verwendet in neuerer Zeit die Plangitter nahezu ausschließlich in der Littrowschen Anordnung (s. oben), indem man das in der Richtung des einfallenden Strahles gebeugte Licht beobachtet. Auch für astrophysikalische Zwecke hat man sehr vollkommene Apparate dieser Art mit großem Auflösungsvermögen konstruiert (Hale, Wood, Voigt). Spektrometer gestatten in der Regel wegen zu geringer linearer Oeffnung ihrer Linsen nicht, das Auflösungsvermögen von Gittern auszunutzen. Verwendet man ein Gitter auf einem Spektrometer, so geschieht dies am zweckmäßigsten in der Weise, daß man den Winkel zwischen Kollimator und Fernrohr fest läßt und das Gitter dreht.

Konkavgitter (vgl. den Artikel „Lichtbeugung") können mit oder ohne Linse benutzt werden. Das erste geschieht in Fällen, in denen man große Lichtstärke haben will. Die klassische Benutzung folgt den Regeln Rowlands. Spalt, Gitter und Kamera liegen dabei auf einem Kreise, der den Krümmungsradius der Gitterfläche zum Durchmesser hat. Gitter und Kamera befinden sich an den Enden eines Durchmessers. Die Spektra der Konkavgitter sind in der Nähe der Gitternormale normal, ihre Dispersion ist also dort proportional der Wellenlänge. Zur Ausnutzung des Auflösungsvermögens guter Konkavgitter ist stabile Aufstellung in Räumen mit konstanter Temperatur erforderlich (Konen). Neuerdings sind von Rowland abweichende Aufstellungen von Konkavgittern vorgeschlagen worden (Wadsworth, Eagle).

2c) Konstruktion der Interferenzapparate. Zur Untersuchung der Feinstruktur von Linien, magnetooptischer Effekte usw. werden in der Regel das Stufengitter von Michelson[1]) oder eine einfache oder zwei gekreuzte Interferenzplatten nach Lummer-Gehrcke benutzt. In beiden Fällen zerlegt man das Licht entweder vor oder nach seinem Durchgang durch den Interferenzapparat mittels eines Spektralapparates von ausreichender Auflösungskraft (z. B. Prismenapparat). Die Interferometer nach Michelson, Fabry und Perot werden[1]) in der Regel benutzt, wenn es sich um relative Messungen von Wellenlängen handelt. Namentlich sind die „Etalons", d. h. Interferometer nach Fabry und Perot mit konstantem Plattenabstande praktisch. Es empfiehlt sich, das Licht nach seinem Durchgange durch einen Interferenzapparat mittels Gitter und passend angebrachtem Spalte in ein Spektrum zu zerlegen. Dann ist es möglich, für jede einzelne Linie Messungen an Interferenzstreifen anzustellen (Fabry und Buisson, Pfund, Eversheim, Priest).

2d) Theorie der Spektralapparate. Man findet die Theorie der Prismen behandelt in den Artikeln „Lichtbrechung" und „Lichtdispersion", die Theorie der Gitter in dem Artikel „Lichtbeugung" und die Theorie der Interferenzapparate im engeren Sinne im Artikel „Lichtinterferenz". Es sei daher hier nur die Rede von den Eigenschaften der Spektra, wie sie durch die verschiedenen Apparate entworfen werden. Der Kürze halber soll dies in der Weise geschehen, daß jede in Frage kommende Eigenschaft eines Spektrums zunächst definiert wird, wie sie sich auf das tatsächliche Spektrum bezieht, dann wird angegeben, wie sie von dem benutzten Instrumente abhängt. Es wird angenommen, daß nur ein Prisma benutzt werde, ferner, daß man das Konkavgitter nach Rowlands Vorschriften benutzt. Der Einfallswinkel heiße i, der Brechungswinkel oder Beugungswinkel r. Genaue Diskussionen aller hierhergehörigen Begriffe rühren her von Lord Rayleigh, Wadsworth, Schuster u. a. Hier sind nur einige Fundamentalbegriffe genannt.

Lineare Ausdehnung des Spektrums. Dieselbe muß bei photographischen, bolometrischen usw. Arbeiten oberhalb einer gewissen Grenze liegen. Sie ist der Brennweite der benutzten Kameralinsen oder Spiegel proportional.

Totaldispersion = Winkel zwischen zwei

[1]) Apparate dieser Art baut u. a. Hilger London.

Richtungen in denen die Grenzstrahlen eines Spektralbereiches abgebildet werden. Sie ist bei allen Apparaten von der Vergrößerung unabhängig.

Winkeldispersion $= \frac{dr}{d\lambda}$, wenn r den Ablenkungswinkel bezeichnet. Für ein Prisma ist $\frac{dr}{d\lambda} = \frac{dr}{dn}\frac{dn}{d\lambda}$, wo n den Brechungsexponenten bedeutet. Im Minimum der Ablenkung ist $\frac{dr}{d\lambda} = \frac{2}{n}$ tg i $\frac{dn}{d\lambda}$, also der „Materialdispersion" proportional. Beim Gitter ist $\frac{dr}{d\lambda} = \frac{m}{a \cos r}$, wo m die Ordnung des Spektrums bedeutet. In der Nähe der Gitternormalen, wo r = o, cos r = 1, ist also das Spektrum normal, der Maßstab konstant, wenn längs des Bogens gemessen wird. Stufengitter: $\frac{dr}{d\lambda} = \frac{c}{\lambda}\frac{t}{s}$ (t Stufenhöhe, s Stufenbreite), c Konstante, falls in der Nähe der Normale beobachtet wird.

Lineare Dispersion $= \frac{ds}{d\lambda}$, wenn s einen an einer Photographie oder sonstwie gemessenen Abstand bedeutet. In der Regel ist der Abstand s = r.f, wenn f die Brennweite des abbildenden Apparates bezeichnet, also $\frac{ds}{d\lambda} = f\frac{dr}{d\lambda}$.

Reinheit $= \frac{\lambda}{d\lambda}$, wenn $d\lambda$ den Bereich der Wellenlängen bezeichnet, die an irgendeiner Stelle des Spektrums sich überdecken. Die wirklich vorhandene Reinheit hängt ab von der Stellung der dispergierenden Apparate, der Form der Flächen, Größe der Winkel, der Breite des Spaltes, der Stelle im Spektrum, der Zusammensetzung des auf den Spalt fallenden Lichtes. Nimmt man an, daß der Spalt unendlich schmal gemacht werden könne, ferner, daß alle optischen Fehler der Instrumente vernachlässigt werden, und sieht man ab von der Wirkung der Zusammensetzung des einfallenden Lichtes, so wird die Reinheit des Spektrums ein Maß für die äußerste Leistungsfähigkeit des Spektralapparates. Man nennt dann lim $\frac{\lambda}{d\lambda}$ das Auflösungsvermögen. Dasselbe ist eine Apparatkonstante. Für ein Prisma ist das Auflösungsvermögen lim $\frac{\lambda}{d\lambda}$ = Winkeldispersion mal Breite des abbildenden Bündels. Beim symmetrischen Durchgang und voller Beleuchtung ist das Auflösungsvermögen $= \frac{dn}{d\lambda}$ mal Basis des Prismas. Beim Gitter ist $\frac{\lambda}{d\lambda}$ = m.n (m Ordnungszahl, n die Zahl der Striche) oder gleich Gitterbreite mal $\frac{\sin r}{\lambda}$; bei allen Interferenzapparaten ist lim $\frac{\lambda}{d\lambda}$ in ähnlicher Weise gleich m.n, wenn n die Zahl der interferierenden Bündel und m die Ordnungszahl bedeutet. Das Auflösungsvermögen wird praktisch nicht über 400 000 gesteigert. Durch die Berücksichtigung der endlichen Spaltbreite und der Fehler der Instrumente bleibt man hinter dem theoretischen Wert zurück. Die Abweichung beträgt jedenfalls mehr als 10 %.

Helligkeit. Die Helligkeit in einem gegebenen Spektrum ist zunächst proportional der Helligkeit in der Lichtquelle. Sie hängt ferner ab von der Reflexion und Absorption an den spiegelnden und brechenden Flächen, von dem Polarisationszustand des Lichtes, von der Stellung und dem Material der dispergierenden Apparate und der Brennweite der abbildenden Linsen, sowie deren linearer Oeffnung. Eine genaue Diskussion aller Momente ist nur von Fall zu Fall ausführbar. Doch lassen sich gewisse allgemeine Regeln geben. So ist zunächst die Helligkeit in allen Fällen proportional dem Quadrate der Winkelapertur der abbildenden Linse oder des abbildenden Spiegels. Ist ein Kollimator da, so ist die Helligkeit gleichfalls dem Quadrate der Winkelöffnung desselben proportional. Freilich wird die Reinheit des Spektrums verringert, wenn man den Kollimator verkürzt. Bezieht man die Helligkeit auf konstante Reinheit, so ist sie proportional $(\alpha/\beta)^2$, wo α die Winkelöffnung der Kamera, β diejenige des Kollimators bedeutet. Für eine gegebene Stellung ist die Helligkeit innerhalb gewisser Grenzen der Spaltbreite umgekehrt proportional, desgleichen umgekehrt proportional der Dispersion. Da diese von Fall zu Fall verschieden ist, pflegt man den mittels eines bestimmten Apparates gemessenen Helligkeitsverlauf auf ein normales Spektrum umzurechnen. Die Helligkeitsverteilung in Gitterspektren entspricht nicht der elementaren Theorie. Sie ist von der zufälligen Gestalt der Furchen abhängig.

Endlich ist der Intensitätsverlauf in einem Spektrum davon abhängig, ob man es mit einem völlig in Linien aufgelösten Spektrum, oder mit einem teilweise aufgelösten Spektrum oder mit einem kontinuierlichen Spektrum zu tun hat.

Bildfehler. Ein Spektrum ist ein Bild im Sinne der Theorie der optischen Instrumente. Es kann daher eine Reihe von Fehlern besitzen, die man in den Artikeln „Optische Instrumente", „Lichtbrechung", „Linsensysteme", behandelt findet. Hier sei nur des Astigmatismus und der Bildkrümmung gedacht. Bei Prismen findet stets astigmatische Abbildung statt, wenn die abbildenden Strahlen den Kollimator nicht parallel verlassen oder nicht im Minimum der Ablenkung durch das Prisma gehen. Im allgemeinen werden daher die Staublinien, die den Schatten von Staubkörnern im Spalte bilden, nicht gleichzeitig mit den Spektrallinien scharf abgebildet. Die Spektralbilder liegen auf Flächen, die je nach den benutzten Prismen und Linsen nach den Prismen zu konkav oder konvex sind und nur für begrenzte Stücke als Ebenen angesehen werden können. Ferner sind die Spektrallinien gekrümmt. Bei Konkavgittern findet gleichfalls astigmatische Abbildung statt. Der Astigmatismus ist der Länge der Gitterstriche und dem Quadrate der Ordnungszahl proportional. Die Spektrallinien sind gleichfalls gekrümmt und liegen auf einer Fläche, die nicht genau mit dem Rowlandschen Kreise zusammenfällt. Auch liegen in der Regel die verschiedenen Ordnungen nicht genau auf derselben Fläche.

Die Bildeigenschaften der Interferenz-Appa-

rate seien hier übergangen. Es sei nur erwähnt, daß neben den Intensitätsmaxima, die wahren Linien entsprechen, sowohl bei Gittern wie bei Interferenzapparaten auch falsche Linien, sogenannte „Geister", auftreten, die in periodischen Unvollkommenheiten der Instrumente ihre Ursache haben.

3. Beobachtungsmethoden, Darstellung der Spektra durch Wellenlängen. Die Absorption oder Emission von Körpern kann auf drei verschiedenen Wegen untersucht werden, durch Messung der Gesamtstrahlung (oder des reflektierten Lichtes), mittels absorbierender Medien oder durch spektrale Zerlegung der Strahlen. Unter das zuerst genannte Verfahren fällt die Kolorimetrie und die Strahlungsmessung durch Bolometer, Thermosäule, Radiometer, Schwärzungsmessungen usw. Man vgl. hierüber besonders die Artikel „Strahlung", „Strahlungsmessung", „Strahlungsumformung", „Photometrie", „Ultraviolett", „Infrarot". Das zweite Verfahren wird zu speziellen Zwecken häufig benutzt, liefert jedoch keine allgemeine und zuverlässige Methode. Es soll im folgenden daher stets die Benutzung der dritten Methode, also Zerlegung der Strahlung in ein Spektrum vorausgesetzt werden. Zur Kenntnis eines Spektrums ist alsdann seine Untersuchung in dem ganzen bisher bekannten Bereiche erforderlich, also zwischen Wellen von der Größenordnung 1 mm bis zu Wellen von der Größenordnung 0,0001 mm. Der Wellenlängenbereich bis zu 0,0008 mm abwärts heißt das Infrarot oder Ultrarot (vgl. den Artikel „Infrarot"). Der Bereich 0,0008 bis 0,0004 mm umfaßt das sichtbare Spektrum. Wellenlängen unterhalb 0,0004 fallen ins Ultraviolett (vgl. den Artikel „Ultraviolett"). Die genannten Grenzen schwanken mit der individuellen Empfindlichkeit des Auges und der Art der Beobachtung.

Zur Kenntnis eines Spektrums ist die Bestimmung der Linien, Banden usw. in dem ganzen genannten Gebiete nach Lage und Intensitätsverteilung erforderlich. Hierzu kommen noch Angaben über die Bedingungen, unter denen das Spektrum hergestellt ist, insbesondere auch über die Konzentration und Schichtdicke der absorbierenden oder emittierenden Substanzen, über den Betrag der Gesamtstrahlung, bei der Absorption außerdem noch Normalangaben für die Lichtquelle. Die Definition aller dieser Größen stößt in der Praxis auf gewisse Schwierigkeiten. So sind nur wenige Spektra einigermaßen vollständig bekannt.

Zu einer Beschreibung eines Spektrums gehört die Angabe aller genannten Größen. In Ermangelung ihrer Kenntnis bedient man sich unvollständiger Beschreibungen. Ueber die Beschreibung der Absorptionsspektra vergleiche man den Artikel „Absorption". Das wichtigste Mittel zur Beschreibung eines Spektrums ist die Angabe der Wellenlängen seiner Banden oder Linien oder, wenn diese nicht genau genug definiert sind, des Ortes des Maximums in ihnen. Bei Absorptionsstreifen liefert der Extinktionsindex als Funktion der Wellenlänge die beste Beschreibung. Neben dem System der Wellenlängen sucht man nach Möglichkeit die Intensitäten der Banden bezw. Linien durch Zahlen oder Intensitätskurven wiederzugeben. Der erste Teil der Beschreibung geschieht durch die Messung der Wellenlängen, der zweite durch die radiometrische, photographische oder photometrische Messung der Intensitätsverteilung. In der Mehrzahl der Fälle hat man sich freilich bisher auf relative Intensitätsschätzungen beschränkt. Die Reproduktion von Spektren erfolgt entweder durch die Wiedergabe der gemessenen Intensitätskurven in einem auf Wellenlängen als Abszissen bezogenen, sogenannten normalen Spektrum oder durch Photographie der Spektra. Nach Uebereinkunft zwischen der Mehrzahl der astronomischen und physikalischen Vereinigungen („Solar Union") wird als Wellenlängennormale, auf die alle anderen Messungen zu beziehen sind, die Wellenlänge der roten Cadmiumlinie benutzt, wie man sie in einer Geißlerschen Röhre unter ganz bestimmten Bedingungen (Ueberschuß des Metalls, Temperatur zwischen 300° und 320° usw.) erhält. Nach Benoît, Perot und Fabry (vgl. den Artikel „Längenmessungen") ist die Länge dieser Welle bei 760 mm und 15° C gleich 0,643 846 96 μ bezogen auf das Meter. Im Bereiche des sichtbaren und ultravioletten Spektrums wird allgemein die Angströmeinheit = zehnmillionstel Millimeter benutzt, gleichfalls nach internationaler Uebereinkunft. Wellenlängen, die auf die genannte Einheit, also λ 6438,4696 bezogen sind, werden durch den Zusatz I. A. gekennzeichnet, um sie von den bisher benutzten, auf das Rowlandsche System bezogenen Wellenlängen zu unterscheiden. An die Cadmiumlinie sind im Bereiche λ 7000 bis 2300 durch Interferenzmessungen Linien aus den Spektren des Eisens und des Nickels angeschlossen worden, die man als sekundäre Normalen bezeichnet. Durch weitere Messungen, in erster Linie mit Gittern, werden an die sekundären Normalen tertiäre Normalen angeschlossen, die als Bezugssystem für alle Wellenlängenmessungen dienen. Die Aufgabe der Bestimmung der Wellenlängen nach dem genannten System ist gegenwärtig noch nicht völlig durchgeführt. Neben neuen Messungen findet man daher vielfach noch Messungen, die unter Benutzung der Rowlandschen Normalen gemacht sind. Eine einfache Umrechnung der beiden Systeme aufeinander ist nicht möglich, da das Verhältnis der beiden Werte sich unregelmäßig ändert.

Im Ultrarot liegen bisher nur die Normalen von Paschen vor, die sich an Rowland anschließen, in dem Gebiete unterhalb 2000 die Normalen von Lyman.

Je nach dem untersuchten Spektralbezirk ist die Methode der Untersuchung verschieden. Im Ultraviolett benutzt man die Photographie, den lichtelektrischen Effekt, die Fluoreszenz oder die Thermosäule zum Nachweis und zur Messung der Strahlen (vgl. den Artikel „Ultraviolett"). Im Bereich des sichtbaren Spektrums wird neben den genannten Hilfsmitteln die okulare Beobachtung benutzt. Im Ultrarot herrschen das Bolometer, die Thermosäule, Radiometer. Daneben benutzt man die Photographie und die auslöschende Wirkung langer Wellen auf das Leuchten phosphoreszierender Körper zur Aufnahme von Spektren. Bei der Untersuchung absorbierender Körper kommen die photometrischen Verfahren zu den genannten hinzu (Spektralphotometer). Benutzt man registrierende Instrumente (z. B. Bolometer, Thermosäulen usw.), so gibt man dem empfindlichen Element die Gestalt eines Streifens

über den entweder das zu untersuchende Spektrum hinweggeführt wird, oder den man durch das Spektrum durchführt. Statt einzelne Ablesungen vorzunehmen, werden vielfach selbstregistrierende Galvanometer zur Aufnahme der Ausschläge benutzt. Photoelektrische Zellen und Selenzellen sind bisher noch wenig zur Aufnahme von Spektren benutzt worden. Innerhalb des Bereichs, in dem ihre Anwendung möglich ist (zwischen 2 μ etwa und 1000 A) ist die Photographie am meisten als Untersuchungsmethode benutzt worden. Im äußersten Ultraviolett verwendet man gelatinearme Bromsilberplatten, nach Schumann, bis etwa λ 4600 gewöhnliche Platten oder feinkörnige Platten, weiter aufwärts nach verschiedenen Methoden sensibilisierte Platten. Bei Benutzung des phosphorographischen Verfahrens wird eine vorbelichtete empfindliche Schicht der zu untersuchenden Strahlung ausgesetzt und dann in Kontakt mit einer photographischen Platte gebracht, die man nachher entwickelt.

Sind in dem zu untersuchenden Spektrum keine bekannten Wellenlängen enthalten, so muß man entweder aus den Apparatkonstanten die Wellenlängen berechnen oder ein Vergleichsspektrum aufnehmen. Vielfach wird hierzu das Bogenspektrum des Eisens benutzt. Die Bestimmung der Wellenlängen geschieht alsdann durch Messung der Winkel zwischen aufeinander folgenden Linien bezw. Banden oder durch Messung der linearen Abstände mittels besonderer Teilmaschinen bezw. durch Projektion von Aufnahmen auf eine geeignete Skala. In Gitteraufnahmen mit Konkavgittern in Rowlandscher Aufstellung interpoliert man linear. In Prismenspektren benutzt man zur Interpolation die Hartmann-Cornusche Formel

$$\lambda = \lambda_0 \quad \frac{c}{(x-x_0)^\alpha},$$

in der λ die Wellenlänge, x die Ablesungen, c, λ_0, x_0 und α Konstanten bedeuten, die man durch Annäherungsverfahren bestimmt. Zur Auswertung eines Spektrums in Wellenlängen lassen sich auch Interferenzstreifen benutzen, die man im Spektrum erzeugt. Diese Methode ist in neuerer Zeit indes wenig benutzt worden.

Für die Benutzung von Bolometern, Thermoelementen, Radiometern usw. sei auf den Artikel „Strahlungsmessung", für die Benutzung von lichtelektrischen Zellen auf den Artikel „Lichtelektrische Erscheinungen", für das photometrische und photographisch-photometrische Verfahren auf den Artikel „Photometrie" verwiesen.

4. Emissionsspektra und Absorptionsspektra. Man kennt von einer Reihe von festen Körpern, Flüssigkeiten und Gasen sowohl Emissions- wie Absorptionsspektra, zum Teil bei derselben Temperatur. In vielen Fällen kennt man nur Emissions- oder nur Absorptionsspektra. Weiter zeigt sich, daß in den Fällen, in denen man beide Arten von Spektren kennt, vielfach das Absorptionsspektrum dem Emissionsspektrum im Sinne des Kirchhoffschen Gesetzes (E_λ $e_\lambda A_\lambda$) entspricht (vgl. den Artikel „Strahlung"), d. h. also daß für jede Wellenlänge das Verhältnis des Emissionsvermögens zum Absorptionsvermögen quantitativ gleich dem Emissionsvermögen des absolut schwarzen Körpers bei derselben Temperatur ist. In anderen Fällen verhalten sich zwar die beiden Spektra so, daß jedem Absorptionsmaximum ein Emissionsmaximum entspricht, allein die Uebereinstimmung läßt sich nicht quantitativ prüfen oder scheint nicht in quantitativem Einklang mit dem Kirchhoffschen Gesetze zu stehen (man vgl. den Artikel „Lumineszenz"). In diesem Falle nimmt man entweder an, daß das Kirchhoffsche Gesetz nicht mehr quantitativ gelte, oder man sucht die Abweichungen durch Nebenumstände, z. B. Inhomogenität der Lichtquelle zu erklären, die es unmöglich macht, von einer bestimmten Temperatur im Sinne des Kirchhoffschen Gesetzes zu sprechen. Kennt man schließlich überhaupt kein Absorptionsspektrum, das dem Emissionsspektrum entspricht oder umgekehrt, so kann man in manchen Fällen dies erklären, indem man sich darauf bezieht, daß bei niedriger Temperatur der Faktor der Absorption (e_λ = Emissionsvermögen des schwarzen Körpers) zu klein wird, um die Emission erkennbar werden zu lassen, oder daß umgekehrt bei hoher Temperatur die Absorption A_λ zu klein sei (z. B. bei N). In vielen Fällen kommt man jedoch mit dieser Annahme nicht aus. Es bleibt dann nur übrig, entweder die Gültigkeit des Kirchhoffschen Gesetzes ganz fallen zu lassen oder anzunehmen, daß das absorbierende Gas nur in besonderen Zuständen ein gegebenes Emissionsspektrum besitzt.

Immerhin bleibt das Kirchhoffsche Gesetz bisher das einzige brauchbare Prinzip zur Verknüpfung von Emission und Absorption. Auch ist eine allgemein anerkannte Widerlegung desselben in einem konkreten Falle noch nicht geliefert worden. Vielmehr haben sich in der letzten Zeit die Argumente zu seinen Gunsten gehäuft (vgl. den Artikel „Strahlungsumformung"). In Ermangelung eines besseren Prinzips wird man sich daher einstweilen des Kirchhoffschen Gesetzes bedienen müssen. Durch dasselbe lassen sich viele Erscheinungen an leuchtenden Dämpfen auf alle Fälle qualitativ erklären. Das gleiche gilt für die Absorption. Hier liefert das Kirchhoffsche Gesetz insbesondere auch die Erklärung der umgekehrten Spektra, d. h. der Absorptionsspektra leuchtender Gase. Berechnet man nämlich nach dem Kirchhoffschen Gesetz den Intensitätsverlauf in einem Spektrum, das von einem glühenden, ein kontinuierliches Spektrum liefernden Körper und einer davor befindlichen leuchtenden Gasmasse herrührt, so findet man, daß

die Linien und Banden dieser Gasmasse hell auf hellem Grunde erscheinen, falls die Temperatur des Gases höher ist als diejenige des Hintergrundes, daß die Linien bei Temperaturgleichheit verschwinden und daß sie relativ dunkler erscheinen als der Hintergrund, wenn dessen Temperatur höher ist als diejenige der Gasmasse. Hierhin gehören Kirchhoffs berühmte Versuche über die Entstehung der D-Linien des Sonnenspektrums.

Weiter erklärt das Kirchhoffsche Gesetz die Intensitätsveränderungen bei der Vergrößerung der Schichtdicke leuchtender Gasmassen usw.

In vielen Fällen wird freilich die Wirkung der Absorption überlagert von der Wirkung der anomalen Dispersion und der anomalen Diffusion. Man vgl. weiter unten und den Artikel „Physik der Sonne".

5. Arten der Spektra. Man kann bei festen, flüssigen und gasförmigen Körpern vier Arten der Spektra unterscheiden: 1. kontinuierliche Spektra, d. h. solche, die bis auf die Energieverteilung dem Spektrum eines schwarzen Strahlers gleichen, nur ein Intensitätsmaximum besitzen, 2. Streifenspektra, d. h. zusammenhängende oder unterbrochene Spektra, die mehr als ein Maximum der Emission oder Absorption besitzen, das auf keine Weise in eine Linie übergeführt werden kann, 3. Bandenspektra, d. h. Spektra, die aus Spektrallinien bestehen, die sehr zahlreich sind und Häufungs-(Konvergenz-)Stellen besitzen, die zugleich Maxima der Intensität sind, 4. Linienspektra, d. h. Spektra, die aus Linien bestehen, deren Häufungsstellen, wenn vorhanden, keine Maxima der Intensität sind.

Diese Einteilung der Spektra ist in gewissem Sinne künstlich, weil sich unter Umständen ein Spektrum in das andere überführen läßt. So kann z. B. ein Gas bei hohem Drucke ein kontinuierliches Spektrum liefern durch Verbreiterung seiner Linien. Oder es können die Banden eines Bandenabsorptionsspektrums bei steigender Dampfdichte zusammenfließen und ein Streifenspektrum bilden usw. Allein auf der anderen Seite sind doch so tiefgreifende Unterschiede zwischen den Spektren der verschiedenen Typen, wenn deutlich ausgebildet, vorhanden, daß es nötig scheint, die vier Arten zu trennen. Möglicherweise ist die Einteilung noch unvollständig. So spricht vieles dafür, daß man zwischen den Banden im Ultrarot und denjenigen im Bereiche kürzerer Wellen wegen des Mechanismus ihrer Entstehung unterscheiden muß. Ferner wird man vermutlich verschiedene Kategorien von Bandenspektren unterscheiden müssen.

6. Herstellung der Spektra. Es ist zu unterscheiden einerseits zwischen Absorptions- und Emissionsspektren, andererseits zwischen den Spektren der verschiedenen Aggregatzustände. Für die Herstellung von Absorptionsspektren von festen Körpern und Lösungen zum Zwecke der Untersuchung vergleiche man den Artikel „Absorption". Feste Körper können durch Temperatursteigerung in jeder Form, ferner durch Belichtung (Phosphoreszenz), Bestrahlung mit Kathodenstrahlen, Kanalstrahlen, Reiben, Kristallisation, Zertrümmern (über die verschiedenen Arten von Lumineszenz vgl. man den Artikel „Lumineszenz") zum Leuchten gebracht werden. Dabei zeigen sie entweder kontinuierliche Spektra mit einer von der schwarzen Strahlung mehr oder weniger abweichenden Intensitätsverteilung (z. B. farbiges Glühen), oder sie liefern Streifenspektra, Bandenspektra oder Linienspektra. In der Regel ist das erstere der Fall. Das emittierte Licht kann auch ganz oder teilweise polarisiert sein (z. B. Turmalin). Die Verfahren zur Herstellung der genannten Leuchtarten sind durch die Benennung gekennzeichnet, in der Praxis freilich sehr verschieden. Im allgemeinen werden die Lumineszenzerscheinungen bei festen Körpern besonders intensiv und charakteristisch, wenn man sie bei tiefen Temperaturen untersucht.

Auch die Flüssigkeiten können durch Temperatursteigerung, Belichtung, Lösung von Kristallen zum Leuchten erregt werden. Man beobachtet alsdann, in Absorption, an glühenden Flüssigkeiten, bei der Fluoreszenz von Lösungen kontinuierliche Spektra, Streifenspektra und zuweilen Bandenspektra. Linienspektra im eigentlichen Sinne sind an Lösungen noch nicht beobachtet, wenngleich manche Lösungen, z. B. diejenigen der seltenen Erden, ziemlich scharfe Absorptionsstreifen besitzen.

In besonders charakteristischer Weise zeigen sich die spektralen Erscheinungen an Gasen, so daß man früher die Regel aufstellte, man müsse einen Körper in Gas verwandeln, um charakteristische Spektra zu erhalten. Besitzt der zu untersuchende Körper bereits Gasform, so kann man ihn in geschlossenen Gefäßen erhitzen (Jod, S, Se) oder in die Flamme einführen (CO_2, H beim Bessemerprozeß) oder man leitet das Gas in einen Kohlebogen (z. B. H_2O) oder man läßt es bei vermindertem Drucke von elektrischen Strömen durchfließen (Geißlersche Röhren) oder man benutzt es als Atmosphäre eines Funkens bei normalem Drucke, oder man belichtet es mit ultraviolettem (Hg) oder sichtbarem Lichte (J). Auch langsame Reaktionen (verbrennender P), Kathodenstrahlen (negatives Stickstoffspektrum), Kanalstrahlen (z. B. in H) und die Strahlen radioaktiver Substanzen (z. B. Stickstoff in der Nähe von $RaBr_2$) vermögen ein Gas zum Leuchten zu erregen. Die meist benutzte Methode besteht in der Einfüllung in Geißlersche Röhren aus Glas oder geschmolzenem Quarz und Durchleitung von Gleichstrom oder Wechselstrom. Diese Methode ist höchst empfindlich, hängt freilich in ihrer Empfindlichkeit von der Mischung der vorhandenen Gase und den Entladungsbedingungen ab. Die Herstellung derartiger Röhren ist zu einer besonderen Kunst geworden und wird auch in der Beleuchtungstechnik angewendet. In neuerer Zeit haben auch die anderen Methoden zur Herstellung

von Gasspektren steigende Beachtung gewonnen. Dies gilt besonders von der Erregung von Gasen durch Entladungsstrahlen, durch Licht und Temperatursteigerung.

Ist der zu untersuchende Körper noch nicht gasförmig, so kann man ihn entweder durch das leuchterregende Mittel selbst vergasen oder vorher verdampfen. In geschlossenen Gefäßen erzeugt man so durch Temperatursteigerung die Spektra der meisten Metalle oder auch Metallverbindungen, ferner Spektra von As, S, Se usw., in Emission und Absorption. Vielfach tritt eine Dissoziation beim Verdampfen und Erhitzen ein, die es zweifelhaft macht, welchem Körper das erhaltene Spektrum zuzuschreiben ist. Ein zweites Verfahren besteht in der Benutzung des elektrischen Bogens oder des elektrischen Funkens. Auf eine Kohle- oder Kupferelektrode bringt man die zu untersuchende Substanz in irgendeiner Form. Beim Entzünden des Bogens oder bei der Einleitung der Funkenentladung setzt eine Verdampfung oder Dissoziation der betreffenden Substanz ein, und man erhält die Spektra der Komponenten von Verbindungen, ferner in der Regel Spektra der Verbindung selbst, sowie zahlreicher anderer Verbindungen mit den Elementen der umgebenden Atmosphäre und der Elektroden. Ist die betreffende Substanz ein Metall oder ein anderer geeigneter Körper, so kann man sie auch unmittelbar als Elektrode für den Bogen oder den Funken benutzen. In beiden Fällen erhält man neben dem Spektrum der zu untersuchenden Substanz auch das Spektrum der Bestandteile der den Bogen oder Funken umgebenden Atmosphäre. Ist im Entladungskreis des Funkens geringe Kapazität und Selbstinduktion, so überwiegen die Linien der umgebenden Atmosphäre. Steigert man die Kapazität und Selbstinduktion, so nehmen die Linien der Atmosphäre an Intensität ab. Bei einem für jeden Körper und gegebene sonstige Bedingungen (z. B. die Atmosphäre) bestimmten Werte von Selbstinduktion und Kapazität werden die Metalllinien relativ am stärksten. — Weiter kann man die zu untersuchenden Körper in geschlossenen Gefäßen erhitzen und den Strom durchleiten (Quecksilberlampen, Röhren mit Cd, Na usw.). — Endlich sind seit der Begründung der Spektralanalyse namentlich bei chemischen Arbeiten die Flammen benutzt worden, um Spektra von zu verdampfenden Substanzen zu erzeugen. Jede Art von Flammen ist brauchbar, wenn auch nicht für jede Substanz in gleicher Weise. Je höher die mit Thermoelement gemessene Temperatur einer Flamme ist, um so intensiver sind in der Regel die erhaltenen Spektra. Dieselben können Linienspektra, Bandenspektra oder kontinuierliche Spektra sein. In der Regel erhält man Bandenspektra und Linienspektra gemischt. Dazu kommen noch die Spektra der Flamme selbst. Die Erscheinungen werden weiter kompliziert durch die verschiedene Wirksamkeit der einzelnen Regionen der verschiedenen Flammen.

Bisher hat sich kein Element bezw. keine Verbindung gefunden, die nicht mittels der genannten Hilfsmittel in Dampfform übergeführt und zur Emission gebracht werden könnte. Es ist keineswegs gleichgültig, welches Hilfsmittel man zur Herstellung eines Spektrums verwendet, da die Spektra nach der Art der Herstellung in der Regel ganz verschieden ausfallen. Zu einer eingehenden Schilderung der in der Praxis üblichen Verfahren bei der Benutzung von Bogen, Funken, Flammen usw. fehlt es hier an Raum.

Wegen der häufigen Benutzung der genannten Methoden zur Herstellung von Spektren spricht man auch von Flammen-, Bogen- und Funken- (bezw. Geißlerrohr-) Spektren, indem man dabei gewisse Grenztypen von Spektren im Auge hat, die vielfach auftreten und indem man zugleich den Nebengedanken an eine steigende Temperaturskala damit verbindet. In welcher Weise jedoch das Leuchten der Gase bei den verschiedenen Erregungsarten in Wirklichkeit zustande kommt und in welchem Umfange die Temperatur im gewöhnlichen Sinne dabei eine Rolle spielt, ist unentschieden.

7. **Beschreibung der Spektra.** Das wichtigste Hilfsmittel zur Beschreibung von Spektren ist die Angabe der Wellenlänge der Maxima der vorhandenen Linien oder Banden wenigstens für Emissionsspektra mit Banden oder Linien. Denn die Erfahrung lehrt, daß die Lage dieser Banden in hohem Maße für jede Verbindung oder jedes Element charakteristisch ist. Auf der geschilderten Konstanz der Lage der Emissions- oder Absorptionsmaxima beruht die Spektralanalyse, d. h. der spektrale Nachweis von Stoffen. Kataloge von Linien, Bandenkanten und Bandenmaxima, wie man sie in der am Schlusse angeführten Literatur findet, sind daher das notwendige Gerippe jeder Beschreibung eines Spektrums und das unentbehrliche Hilfsmittel zur Spektralanalyse. Wie bereits im Abschnitt 3 hervorgehoben ist, genügt ein derartiger Katalog indes nicht (vgl. auch den Artikel „Spektralanalyse").

7a) Kontinuierliche Spektra. Handelt es sich um ein kontinuierliches Emissionsspektrum, so verlangt man außer der Lage des Maximums den Intensitätsverlauf zu kennen und zwar möglichst für verschiedene Erregungsbedingungen. Ist die untersuchte Strahlung eine Temperaturstrahlung, so erhält man, soweit bisher bekannt, Regeln, die denjenigen für schwarze Körper in mancher Hinsicht ähnlich sind. Da die Maxima in kontinuierlichen Spektren in der Regel flach sind, so läßt sich die Wellenlänge der größten Intensität im allgemeinen nur ungefähr angeben. Doch findet man hier viele Ausnahmen.

7b) Streifenspektra. Diese gestatten schon eine genauere Angabe der Lage der Wellenlänge der Maxima. Allein auch hier muß man zu einer ausreichenden Beschreibung noch den Intensitätsverlauf in den Maxima kennen. Man hilft sich in vielen Fällen mit der Angabe der sogenannten Grenzen der Streifen. Nur selten sind diese Grenzen indes scharf definiert. Zumeist fällt die

Intensität allmählich nach Null ab. Es hängt dann von der Beobachtungsmethode und von der Intensität der Erregung ab, wie weit sich die Streifen in jedem Falle ausdehnen. Bei Benutzung geringer auflösender Kraft werden die Bandenspektra durchweg als Streifenspektra gesehen. In manchen Fällen, wie z. B. bei fluoreszierenden Lösungen hängt der Intensitätsverlauf und die Intensität in den Streifen auch noch von der benutzten Schichtdicke der leuchtenden Substanz und anderen Umständen ab. Ohne bestimmte Angaben hierüber hat dann eine Beschreibung eines Spektrums wenig Wert. Im allgemeinen sind die Kenntnisse über die feineren Eigenschaften der Streifenspektra noch gering.

7c) Linien- und Bandenspektra. In jedem Linien- oder Bandenspektrum besitzen die Linien endliche Breite. Sie sind als schmale Stücke eines kontinuierlichen Spektrums mit bestimmter Intensitätsverteilung anzusehen. Ob sie das in jeder Beziehung sind, steht dahin. Jedenfalls kann man durch Absorption, z. B. in Joddampf außerordentlich schmale Stücke eines kontinuierlichen Spektrums herausschneiden, die sich in jeder Hinsicht wie Spektrallinien verhalten. In der Praxis besitzen alle Linien schon deshalb eine endliche Breite, weil wir sie zur Untersuchung abbilden müssen. Wie die Theorie der optischen Instrumente zeigt, erhält dadurch jedes Bild eine bestimmte Breite und Struktur. Man muß also zwei Fälle unterscheiden, je nachdem die auflösende Kraft des benutzten Instrumentes größer oder kleiner ist als die Linienbreite. Im ersten Falle kann man von einer Struktur und Intensitätsverteilung innerhalb einer Linie sprechen. Bei Benutzung großer Gitter in höheren Ordnungen oder Interferenzapparaten erweisen sich zahlreiche Linien wieder aus mehreren Einzellinien zusammengesetzt, auch wenn sie in weniger starken Apparaten als scharfe Linien erscheinen. So besteht die grüne Quecksilberlinie mindestens aus sechs Komponenten. Man spricht in diesem Falle von Feinstruktur der Linien und nennt die Komponenten Trabanten oder Satelliten. In anderen Fällen bleibt die Linie für alle bisher zur Verfügung stehenden Hilfsmittel einfach, d. h. sie besitzt nur ein, meist scharf ausgeprägtes Maximum. Auf dieses Maximum, das, wie die Erfahrung lehrt, unter wechselnden Bedingungen sehr genau seine Lage im Spektrum beibehält, wird die Wellenlänge einer Linie bezogen. Dies ist bei scharfen Linien und für Messungen unterhalb 1 μ bis auf weniger als 0,001 A möglich. Mit zunehmenden Wellenlängen wächst auch die Breite der Linien in der Skala der Wellenlängen.

Eine einfache Linie kann scharf, unscharf = diffus oder verbreitert sein.

Diese Bezeichnungen sind im Gebrauch nicht genau festgelegt. Scharf ist eine Linie, wenn sie bei ausgesprochenem Maximum schnell nach beiden Seiten auf einen unmerklichen Intensitätsbetrag hinabsinkt und auch bei großer auflösender Kraft diese Eigenschaft bewahrt. Die Halbbreite $\frac{d\lambda}{\lambda}$ in der Skala der Schwingungszahlen ist ein Maß der Schärfe. Sehr scharfe Linien haben etwa eine Halbbreite $d\lambda/\lambda = 5.10^{-7}$. Doch wird man in Bandenspektren diese Grenze noch weit herabdrücken können. Diffus ist eine Linie, wenn sie die gegenteiligen Eigenschaften einer scharfen Linie besitzt und nicht in eine solche übergeführt werden kann, verbreitert, wenn das letztere der Fall ist. Weiter kommen häufig einseitig unscharfe oder verbreiterte Linien vor. Besitzt eine Linie mehrere Maxima, so ist sie mehrfach oder umgekehrt. Auf diese letztere Erscheinung ist sogleich noch einzugehen. In der Praxis ist es oft nicht möglich, mehrfache Linien von umgekehrten zu unterscheiden. Wünschenswert wäre die Kenntnis des Energieverlaufes in allen Linien eines Spektrums. Es sind jedoch erst Anfänge derartiger Untersuchungen vorhanden.

7d) Absorptionsspektra. Für diese gelten die gleichen Bemerkungen. Man benutzt hier statt der Energieverteilung die Verteilung des Absorptionsvermögens über die Linienbreite. Doch fehlen auch hier genauere Kenntnisse.

7e) Linien der Bandenspektra. Die Eigenschaften der Linien der Banden spektra sind im allgemeinen weniger bekannt als diejenigen der Linienspektra, schon deshalb, weil bisher eine völlige Auflösung der linienreicheren Bandenspektra nur in Ausnahmefällen geglückt ist. Es scheint jedoch, daß auch die Linien der Bandenspektra unter sich verschieden sind und verschiedenen Charakter besitzen.

7f) Umgekehrte und geflügelte Linien. Zeigt eine Spektrallinie in Emission oder Absorption mehrere Maxima, die verursacht sind durch die Superposition der Strahlung derselben Linie unter verschiedenen Entstehungsbedingungen, so nennt man die Linie einfach oder mehrfach umgekehrt oder auch selbstumgekehrt. Eine einfach umgekehrte Emissionslinie scheint aus der Superposition einer dunklen und einer hellen Linie zu bestehen. Man kann die Entstehung von Umkehrungserscheinungen erklären auf Grund des Kirchhoffschen Gesetzes (vgl. oben), wenn man annimmt, daß

verschieden temperierte, hintereinander befindliche Gasschichten von verschiedener Dichte Linien verschiedener Breite aussenden. Die Rechnung zeigt alsdann, daß einfache oder mehrfache Umkehrungen auftreten können. In Bogenspektren sind derartige Umkehrungen die Regel. Man erklärt sie durch den Umstand, daß der Kern des Bogens heißer ist und breitere Linien liefert als die kühleren Außenpartien, die schärfere Linien emittieren. Auch in Flammen und Geißlerröhren findet man leicht umgekehrte Linien, desgleichen im Sonnenspektrum, namentlich in Sonnenflecken. Hier treten außerdem auch noch geflügelte Linien auf, d. h. Linien, die (in Absorption) auf beiden Seiten von einseitig scharfen Absorptionsbanden begleitet sind.

7g) Dispersions- und Diffusionsbanden. Es ist anzunehmen, daß außer der Absorption in diesen und ähnlichen Fällen noch zwei weitere Momente das Aussehen der Linien beeinflussen. Julius hat zuerst darauf hingewiesen, daß infolge der schnellen Aenderung des Brechungsexponenten in der Nähe von Absorptionslinien in inhomogenen Dämpfen Emissionslinien oder -streifen oder Absorptionsstreifen vorgetäuscht werden können, die dem Aussehen nach in keiner Weise von wahren Absorptionsstreifen bezw. Emissionsstreifen zu unterscheiden sind. Ferner findet in ähnlicher Weise in der Nähe von Absorptionslinien ein Anwachsen der Diffusion statt, die zu einer Verbreiterung der Linien (in Absorption) führt und erwarten läßt, daß in genügend dichten Dämpfen jede Absorptionslinie von einem zweiseitigen Diffusionsband eingehüllt ist. Da nun an vielen in Absorption erhaltenen Linien und einer Reihe von Absorptionsbanden anomale Dispersion nachgewiesen ist, so muß man annehmen, daß die anomale Dispersion und die anomale Diffusion in vielen Fällen das Aussehen von Absorptionslinien (aber auch Emissionslinien) entscheidend beeinflussen. Man vgl. für weiteres den Artikel „Physik der Sonne".

7h) Verteilung der Intensität. Neben dem Aussehen der Einzellinien und ihrer Intensitätsverteilung hat die Verteilung der Intensität in gewissen Liniengruppen, speziell den Serien (man vgl. „Gesetzmäßigkeiten" weiter unten) sowie im ganzen Spektrum Interesse. Es zeigt sich nämlich, daß mit verschiedener Erregung des Leuchtens unter Umständen die Intensitätsverteilung in einem Linien- oder Bandenspektrum eine andere wird. Man hat geglaubt, hierin ähnliche Erscheinungen wieder zu finden wie bei der Wanderung des Maximums in dem Spektrum eines schwarzen Körpers. Die Untersuchungen auf diesem Gebiete stoßen auf große Schwierigkeiten und haben bisher noch nicht zu abschließenden Resultaten geführt.

7i) Andere Eigenschaften. So vielseitig die Anforderungen sind, die nach dem Vorstehenden an die Beschreibung eines Spektrums gestellt werden, so genügen sie indes noch keineswegs. Es zeigt sich nämlich, daß die Mehrzahl der Linien eines Spektrums noch durch besondere Eigenschaften gekennzeichnet sind, z. B. durch die anomale Dispersion, die sie hervorrufen, durch die Veränderungen im Magnetfelde, die sie erleiden usw. Man vgl. hierfür das Folgende. Aus diesem Grunde ist die Erforschung eines Spektrums eine Aufgabe von größter Komplikation, die erst in wenigen Fällen teilweise durchgeführt ist.

8. Konstanz der Spektra. Spektralanalyse. Untersucht man eine Anzahl von Spektren, vor allem Linien- und Bandenspektra unter stets gleichen Bedingungen, z. B. im Bogen oder im Funken, so zeigt jedes Element ein charakteristisches Spektrum. Mit der benutzten Substanzmenge ändern die Linien wohl ihre Intensität oder ihre Breite; auch die Anwesenheit fremder Elemente vermag die Intensität zu beeinflussen. Allein die Wellenlänge der Linien, ihr Platz im Spektrum bleibt in engen Grenzen unverändert. Nimmt die Substanzmenge ab, so bleiben von dem Spektrum in der Regel nur wenige, meist die stärksten Linien übrig. Hierauf gründet sich die Spektralanalyse. Eine einzige hervorragend starke Linie eines Elementes, z. B. die gelbe Heliumlinie läßt, wenn genau genug gemessen, den Nachweis zu, daß das betreffende Element gegenwärtig ist. Werden mehrere Linien gemessen, so steigert sich die Wahrscheinlichkeit zur Gewißheit. Die Empfindlichkeit dieser Reaktion für viele Elemente und ihre Sicherheit ist sprichwörtlich. Besonders eignen sich Bogen und Funken zur Spektralanalyse, allein auch die Flammen sind für manche Elemente außerordentlich empfindlich, ebenso Vakuumröhren für Gasspektren. Weniger empfindlich pflegen die Streifenspektra zu sein, wenn auch hier die Empfindlichkeit unter Umständen sehr groß ist (vgl. den Artikel „Absorption"). Es findet daher seit Bunsen und Kirchhoff die Spektralanalyse in Chemie, Physik und Astronomie vielfache Anwendung. Zahlreiche Elemente, u. a. Rb, Cs, Tl, Ga, In, He, Ne, sowie zahlreiche seltene Erden, sind auf diesem Wege zuerst gefunden worden. Dabei hat man die verschiedensten Methoden benutzt: Flammenreaktionen, Funkenspektra, Geißlerrohrspektra, Bogenspektra, Phosphoreszenzspektra, Absorptionsspektra.

Handelt es sich um den Nachweis mehrerer Spektra nebeneinander, so sind bestimmte

praktische Regeln zu beobachten, die hier nicht wiedergegeben werden können (Bunsen, Lockyer, de Gramont, Formánek). Man vgl. den Artikel „Spektralanalyse".

Die ungeheuere Empfindlichkeit der spektralanalytischen Reaktionen erschwert ihre Verwendung zu einer quantitativen Analyse. Während die Absorptionsspektra vielfach zu quantitativen Untersuchungen benutzt werden (vgl. die Artikel „Absorption", „Spektralanalyse") hat sich eine quantitative Emissionsanalyse nur unter ganz speziellen Bedingungen ausführen lassen. Die vorgeschlagenen Verfahren seien daher an dieser Stelle übergangen.

Die Spektralanalyse ist nicht nur auf die Emissionsspektra der Elemente oder Absorptionsspektra von Verbindungen beschränkt. Wie de Gramont gezeigt hat, eignen sich die Funkenspektra auch zur Analyse der meisten anorganischen Verbindungen. Man erhält zugleich die Spektra der Metalloide, falls man passende Bedingungen für die Funken einhält. Zum Nachweis bestimmter Elemente eignen sich alsdann besonders die sogenannten „Restlinien", d. h. die Linien, die bei abnehmender Konzentration und zunehmender Selbstinduktion im Entladungskreise allein übrig bleiben.

Der negative Ausfall einer spektralanalytischen Reaktion ist nicht beweisend für die Abwesenheit eines Elementes. Denn häufig genügt die dissoziierende Wirkung der benutzten Leuchterregung nicht, um das fragliche Element in Freiheit zu setzen, oder es treten andere Momente hinzu, die das Leuchten der betreffenden Substanz verhindern, z. B. in Halogen-Wasserstoffflammen. Das Fehlen von Linien in manchen Lichtquellen, z. B. im Sonnenspektrum, sagt daher nichts über das Fehlen der fraglichen Elemente.

9. Mehrfache Spektra. Verbindungsspektra. 9a) Mehrfache Spektra. Plücker und Hittorf haben zuerst nachgewiesen, daß chemisch einfache Körper mehrere Spektra besitzen können. Man kennt gegenwärtig fast von allen Elementen mehrere Spektra, d. h. in der Regel Spektra, die keine Linie miteinander gemeinsam haben und sich in ihrem Charakter vielfach völlig unterscheiden. In manchen Fällen gelingt es, die verschiedenen Spektra eines Stoffes völlig voneinander zu trennen. In anderen erhält man Gemische der verschiedenen Spektra. Neben einem Linienspektrum besitzen die meisten Elemente ein Bandenspektrum. Zuweilen kennt man mehrere Linien- und Bandenspektra desselben Körpers. So besitzt Argon zwei verschiedene Linienspektra, die sich völlig trennen lassen, Wasserstoff zwei Linienspektra, die sich nicht völlig trennen lassen. Sauerstoff besitzt zwei Linienspektra und mehrere, mindestens drei Bandenspektra. Bei Aenderung der Leuchtbedingungen erfolgt in manchen Fällen ein plötzlicher Umschlag des einen Spektrums in das andere. Auch findet man in verschiedenen Teilen einer Lichtquelle, z. B. einer Geißlerschen Röhre, häufig verschiedene Spektra desselben Elementes. Der Umschlag des einen Spektrums in das andere kann dabei durch die verschiedensten Umstände bedingt sein, z. B. Aenderung der Stromdichte, der Dimensionen der benutzten Gefäße, der Menge der leuchtenden Substanz, der Temperatur der Flammen oder erhitzten Gefäße, durch die Herstellung von Oszillationen. Eine gewisse Ordnung in die Mannigfaltigkeit der Vorgänge bringt die Regel, daß im allgemeinen bei stärkerer Erregung, also z. B. bei höherer Temperatur, bei Einleitung starker Schwingungen, die Bandenspektra der Elemente in Linienspektra übergeführt werden.

9b) Verbindungsspektra. Die Verbindungen zeigen mehr oder weniger charakteristische Spektra. Es soll hier nur von den Emissionsspektren die Rede sein. Gelingt es, eine Verbindung ohne Zersetzung zum Leuchten zu erregen (z. B. organische Substanzen nach Lehmann-Goldstein in ultraviolettem Licht oder in Kathodenstrahlen oder in fluoreszierenden Lösungen, andere Körper in Flammen, in geschlossenen Gefäßen, im Bogen, im Funken), so zeigen sich neben kontinuierlichen Spektren Streifenspektra oder Bandenspektra, niemals Linienspektra. Diese Spektra sind stets für die betreffende Substanz charakteristisch. Es fehlt jedoch an einem Kriterium für die Unterscheidung von den Bandenspektren chemischer Elemente. Bei der ungeheueren Empfindlichkeit der spektralanalytischen Reaktionen und der Komplikation der chemischen Prozesse, die sich in den gebräuchlichen Lichtquellen, zumal in Flammen, Bogen und Funken abspielen, bleibt es in vielen Fällen von Emissionsspektren sehr schwer zu entscheiden, ob ein auftretendes Spektrum einer bestimmten Verbindung oder einem Element angehört. So herrscht über den Ursprung zahlreicher Bandenspektra, z. B. der sogenannten Oxydspektra der Metalle, der verschiedenen Spektra der Kohle usw., Unklarheit. Die folgende Uebersicht über die mehrfachen Spektra der Elemente und die bekannten Emissionsspektra ist daher nur mit Reserve zu geben. In der Uebersicht bedeutet die Ziffer vor „L." die Zahl der bekannten Linienspektra, vor „Bd." die Zahl der Bandenspektra. Die Verbindungsspektra sind nur durch ihre Formel gekennzeichnet. Sie sind sämtlich Bandenspektra. Die Reihenfolge ist diejenige des natürlichen Systems.

Eine Aufzählung der in Absorption, Phosphoreszenz, Fluoreszenz bekannten Verbindungsspektra ist hier nicht möglich. Wo in der folgenden Uebersicht ein Absorptionsspektrum mit benutzt wird, ist dies durch einen Zusatz kenntlich gemacht.

(Tabelle siehe nächste Seite.)

10. Veränderlichkeit der Spektra. Während in den ersten Zeiten der Entwickelung der Spektroskopie infolge der spektralanalytischen Anwendungen die Konstanz der Spektra und ihrer hauptsächlichen Typen betont wurde, hat man in neuerer Zeit immer mehr die Aufmerksamkeit auf die Veränderlichkeit der Spektra gerichtet und daraus Gesichtspunkte für die Beurteilung des Mechanismus der Emission und Absorption zu gewinnen versucht.

10a) Mehrfache Spektra. Der Uebergang eines Spektrums in ein anderes im Falle mehrfacher Spektra stellt das höchste Maß der Veränderlichkeit eines Spektrums dar. Der Vorgang kann sich so abspielen, daß nach Ueberschreitung eines bestimmten kritischen Wertes in Stromdichte, Spannung oder dgl. plötzlich sämtliche Linien des einen Spektrums verschwinden und durch diejenigen eines zweiten ersetzt werden. Er kann auch so vor sich gehen, daß neben den verblassenden Linien und Banden des einen Spektrums allmählich die Linien des neuen Spektrums an Stärke gewinnen. Niemals aber erfolgt der Uebergang durch Verschiebung der Linien eines Spektrums in andere Positionen.

10b) Veränderungen, Auftreten und Verschwinden einzelner Linien je nach der Art der Erregung. Die Veränderung kann auch einzelne Gruppen von Linien oder einzelne Linien betreffen, ohne daß sich die Mannigfaltigkeit der praktisch vorkommenden Fälle in eine Regel fassen ließe. So findet man, daß einzelne Linien oder Liniengruppen nur in bestimmten Teilen einer Lichtquelle, z. B. in der Nähe der Pole einer Bogenlampe oder an der Kathode einer Geißlerschen Röhre oder in der Reduktionszone einer Flamme vorkommen, in anderen Teilen aber fehlen. Oder aber man findet, daß gewisse Gruppen von Linien nur stark hervortreten, wenn bestimmte Leuchtbedingungen eingehalten werden. Dies gilt z. B. von zahlreichen Linien der Funkenspektra der Metalle, die nur stark werden in Löschfunken, im Bogen oder in Wechselstromfunken jedoch schwach werden oder verschwinden, während dann andere Linien, besonders Serienlinien, an Stärke gewinnen. Aus diesem Grunde werden auch die Bezeichnungen Flammen-, Bogen- und Funkenlinien (enhanced lines) benutzt, obwohl die Unterscheidung keine völlig zutreffende ist. Es gehört unter die genannten Erscheinungen, daß die Einschaltung von Selbstinduktion in Entladungskreise verschieden auf die verschiedenen Linien eines Spektrums einwirkt und ferner, daß die Spektra derselben Elemente und Verbindungen in verschiedenen Lichtquellen, z. B. in Kathodenstrahlen, Kanalstrahlen oder während der Fluoreszenz verschieden sind.

10c) Aenderungen in Abhängigkeit von Erregungsstärke und Dampfdichte. Auch die Stärke der Erregung wirkt verschieden auf die einzelnen Linien und Banden ein. Steigert man z. B. die Stromdichte in einer Quecksilberbogenlampe, so ändert sich die relative Intensität der einzelnen Linien, obwohl ihre Gesamtintensität zunimmt. In den einzelnen Serien rückt das Maximum nach kürzeren Wellen, allein in verschiedenen Serien in verschiedenem Grade.

Desgleichen wirkt die Dampfdichte leuchtender Gase verschieden auf verschiedene Linien. Es zeigt sich, daß in der Regel mit steigender Dichte die Linien sich verbreitern, unter Umständen zu Streifen sich ausdehnen oder gar zu einem lückenlosen Spektrum zusammenfließen. Doch werden nicht alle Linien in gleicher Weise beeinflußt. Man findet häufig Linien, die relativ scharf bleiben, während sich andere bedeutend verbreitern. Die Verbreiterung vermag dabei eine einseitige oder auch eine symmetrische zu sein. Es scheint, daß die Dampfdichte besonders auf die Schärfe der Linien Einfluß hat, während sie die Intensität der Linien in sehr verschiedener Weise beeinflußt. Linien die bei allen Dichten und Erregungsstärken sichtbar sind, heißen nach Lockyer „lange" Linien, weil sie länger als die übrigen sind, wenn man den Spalt quer zu dem Bilde eines Bogens stellt, bei stigmatischer Abbildung.

10d) Abhängigkeit von Schichtdicke, Temperatur, Druck. Auch die Steigerung der Schichtdicke, der Temperatur oder des Druckes vermögen die Linien eines Spektrums zu verbreitern, desgleichen die Wirkung eines fremden Gases, mit dem der leuchtende, absorbierende oder fluoreszierende Dampf gemischt ist. Dabei ist wiederum die Wirkung auf die einzelnen Linien bezw. Banden eines Spektrums eine verschiedene. Für zahlreiche Linien und Liniengruppen kennt man die Bedingungen, unter denen sie auftreten und gewisse Eigenschaften besitzen. Für andere, z. B. die aus dem Spektrum des Sternes ζ-Puppis zuerst bekannt gewordene Serie des Wasserstoffspektrums sind die Laboratoriumsbedingungen noch nicht aufgefunden.[1])

[1]) Dies ist inzwischen auch geglückt (Anmerkung bei der Korrektur).

H[2L H_2O]								
He[1L]	**Li**[1L, 1Bd Abso.]	**Be**[1L 1Bd]	**B**[1L 1Bd]	**C**[1L 1Bd] [CO, CO_2, Cy, CH_2]	**N**[1L 3Bd] [NO, Cy, NO_2]	**O**[2L, 3Bd] [Oxyde, Ozon]	**F**[1L] viele Verb.	
Ne[1L]	**Na**[1L, 1Bd Abso.]	**Mg**[1L] [MgO, MgH, MgF_2, $MgCl_2$, $MgBr_2$, MgJ_2]	**Al**[1L, 1Bd]	**Si**[1L, 6Bd] [Haloid-Verb.]	**P**[1L, 4Bd]	**S**[2L, 1Bd] [SO_2]	**Cl**[1L, 1Bd] viele Verb.	
A[2L]	**K**[1L, 1Bd Abso.]	**Ca**[1L, 1Bd] [CaO, Haloid-Verb.]	**Sc**[1L, 1Bd]	**Ti**[1L 1Bd] [$TiCl_4$]	**V**[1L, 1Bd]	**Cr**[1L, 1Bd]	**Mn**[1L] [Oxyde]	**Fe**[1L, 1Bd] **Co**[1L] **Ni**[1L, 1Bd]
	Cu[1L, 1Bd] [CuO, Haloid-Verb.]	**Zn**[1L, 1Bd]	**Ga**[1L]	**Ge**[1L]	**As**[1L 1Bd]	**Se**[2L, 1Bd]	**Br**[1L, 1Bd] [viele Verb.]	
Kr[2L]	**Rb**[1L, 1Bd Abso.]	**Sr**[1L, 1Bd] [SrO, Haloid-Verb.]	**Y**[1L 1Bd]	**Zr**[1L 1Bd]	**Nb**[1L, 1Bd]	**Mo**[1L]		**Ru**[1L] **Rh**[1L] **Pd**[1L 1Bd]
	Ag[1L, 1Bd]	**Cd**[1L 1Bd]	**Jn**[1L 1Bd]	**Sn**[1L 1Bd]	**Sb**[1L 1Bd]	**Te**[1L 1Bd]	**J**[1L 1Bd] [viele Verb.]	
X[2L]	**Cs**[1L, 1Bd Abso.]	**Ba**[1L 1Bd] [BaO, Haloid-Verb.]	**La**[1L, 1Bd]	**Ce**[1L]	**Ta**[1L]	**Wo**[1L 1Bd]		**Os**[1L] **Jr**[1L] **Pt**[1L 1Bd]
	Au[1L, 1Bd] [$AuCl_3$]	**Hg**[1L 1Bd] [Haloid-Verb.]	**Tl**[1L 1Bd]	**Pb**[1L 1Bd] [Chlorid]	**Bi**[1L 1Bd]			
Nt[1L]		**Ra**		**Th**[1L 1Bd]		**U**[1L 1Bd]		

Außerdem Dy[1L] Er[1L] Eu[1L] Gd[1L, 1Bd] Cp[ ] Lu[1L] Nd[1L] Nb[1L] Ny-Ad[1L, 1Bd] Po[1L] Pr[1L] Sa[1L] Tb[1L, 1Bd] Tm Tu[1L]

10e) Umkehrungserscheinungen. Von diesen ist bereits weiter oben die Rede gewesen.

10f) Druckverschiebung. Neben der verbreiternden Wirkung einer Drucksteigerung kennt man noch einen Einfluß des Druckes auf die Intensität von Linien und auf die Wellenlänge ihres Maximums. Wie zuerst Humphreys und Mohler nachgewiesen haben, nimmt die Wellenlänge der Linien eines Spektrums mit wachsendem Drucke zu und zwar für verschiedene Linien in verschiedenem Maße, im Durchschnitt proportional der Wellenlänge. Die Größe der Verschiebung beträgt wenige Hundertstel A. pro Atmosphäre, sie scheint dem Drucke proportional zu sein. Linien, die derselben Serie angehören, zeigen in der Skala der Schwingungszahlen dieselbe Verschiebung. Verschiebungen innerhalb verschiedener Linien, z. B. denjenigen verschiedener Sterne (s. weiter unten) stehen vielfach in nahezu ganzzahligen Verhältnissen (kleine Zahlen). Im einzelnen finden sich viele Ausnahmen und Komplikationen, die hier übergangen werden müssen (Humphreys, Duffield). Banden verschieben sich äußerst selten.

10g) Dopplereffekt. Kinematische Betrachtungen über Wellen und die Anwendung der Relativitätstheorie auf die Lichtwellen führen zum Schlusse, daß die Schwingungszahl, also auch die Wellenlänge einer Lichtart von der relativen Bewegung von Lichtquelle und Beobachter sowie von der relativen Bewegung zwischen Lichtquelle und Beobachter befindlicher dispergierender Massen abhängig sind. Das von Doppler entdeckte Prinzip findet seinen Ausdruck in der angenäherten Formel $\lambda = \lambda_0\left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$, wo λ die beobachtete Wellenlänge, v die relative Geschwindigkeit von Beobachter und Lichtquelle und c die Lichtgeschwindigkeit bedeuten. Entfernt sich die Lichtquelle, so gilt das obere Zeichen. Wie man sieht, sind wegen der Größe von c die eintretenden Aenderungen der Wellenlänge nur klein. Für eine Wellenlänge λ 3000 und eine Geschwindigkeit v = 100 km/sec. würde die Aenderung von λ erst eine A. betragen. Formeln für den Einfluß der Bewegung von Spiegeln oder brechenden Medien auf die Wellenlänge rühren von W. W. Michelson her.

Das Dopplersche Prinzip findet zunächst seine Anwendung in der Astrophysik, wo es eines der meist benutzten Prinzipien bildet und durch seine Anwendung auf anderwärts bekannte Bewegungen wohl begründet ist. Im Laboratorium ist es geprüft mittels rotierender Spiegel. Es findet hier seine Anwendung auf die Verbreiterung der Linien eines Spektrums infolge der nach den Grundsätzen der kinetischen Gastheorie berechneten Bewegungen der leuchtenden Moleküle im Visionsradius. Mit Hilfe der empfindlichen Interferenzapparate ist es ferner gelungen, die Dopplersche Verschiebung von Linien an strömenden Gasen nachzuweisen, wenn die Geschwindigkeit nur einige Hundert Meter pro Sekunde betrug. Dann hat J. Stark gefunden, daß die Emission der Kanalstrahlen in verschiedenen Gasen eine Linienverschiebung besitzt, wenn man in der Richtung der Kanalstrahlen oder in spitzen Winkeln dazu beobachtet. Bei Beobachtung in einer der Richtung der Kanalstrahlen entgegengesetzten Richtung zeigt sich in der Regel, nicht immer, eine doppelte Linie, die sogenannte ruhende und bewegte Linie. Zwischen beiden ist ein dunkler Zwischenraum, der indes auch unter Umständen fehlen kann. Die verschobene Linie liegt nach der violetten Seite. Ihre Intensität fällt nach Violett hin allmählich, nach der ruhenden Linie hin steiler ab. Die bewegte Linie entspricht ungefähr der Geschwindigkeit der Kanalstrahlen im Visionsradius, die sich für diese berechnet, wenn man für die Masse die der positiven Atomionen annimmt und die Geschwindigkeit aus dem Kathodenfall ableitet. Auch an Anodenstrahlen wird der gleiche Effekt beobachtet (Gehrcke und Reichenheim). Nur Linien zeigen den Dopplereffekt. Für Linien einer Serie hat er, soweit bekannt, die gleiche Größe. Ueber die Erklärung der Erscheinungen im einzelnen, den Einfluß der ruhenden Gase, die Frage nach der Ladung der die bewegte Intensität liefernden Teile, über die Leuchtprozesse im Kanalstrahle gehen die Meinungen noch auseinander (vgl. den Artikel „Kanalstrahlen").

10h) Absorption, Dispersion. Auch hinsichtlich der Absorption und der daraus abzuleitenden Dispersion verhalten sich die verschiedenen Linien eines Spektrums verschieden. Dies zeigt sich zunächst an der verschiedenen Umkehrbarkeit. Während sich manche Linien eines Spektrums leicht umkehren lassen, z. B. die Linien der Hauptserien der Alkalien, die Banden des Strontiumfluorids, gelingt dies bei anderen Linien desselben Spektrums, z. B. den Linien der ersten Nebenserie nur unter besonderen Umständen. Bei vielen Linien oder Banden (z. B. diejenigen des Stickstoffs) ist es bisher nicht gelungen sie umzukehren, sei es in Form von Selbstumkehrung, sei es in Form von Umkehrung gegen ein kontinuierliches Spektrum. Ein Maß für die direkt schwer meßbare Absorption in den Linien der Linien- und Bandenspektra bildet die anomale Dispersion, die sich in der Nähe der Linien zeigt. Durch direkte Messung von Brechungsexponenten ist in neuerer Zeit die anomale

Dispersion für eine größere Zahl von Linien aus Linienspektren gemessen worden, z. B. für H und die Alkalien (Puccianti, Wood, Ladenburg, Bevan u. a.). Es haben sich so Zusammenhänge mit der Dampfdichte usw. und der Größe der Absorption ergeben, ferner Anhaltspunkte für den Verlauf der Absorption innerhalb verschiedener Linien eines Spektrums, zumal in den Linien ein und derselben Serie. Unter Benutzung der bewährten Dispersionsformeln gelangte man dabei in vielen Fällen zu dem Schlusse, daß auch in den Linien ein und derselben Serie die Zahl der Dispersions-, d. h. Absorptionselektronen eine verschiedene sein könne (Ladenburg, Bevan).

10i) Magnetooptische Eigenschaften. Eng verknüpft mit den im vorigen Abschnitt genannten Erscheinungen sind die magnetooptischen Effekte, die man einteilen kann in Zeemaneffekt, magnetische Drehung der Polarisationsebene in der Nähe von Absorptionslinien und magnetische Doppelbrechung der leuchtenden resp. absorbierenden Dämpfe. Man vgl. hierfür den Artikel „Magnetooptik". Hier sei nur erwähnt, daß die magnetooptischen Effekte innerhalb der Linien eines Linienspektrums sehr verschieden sind. Am genauesten bekannt ist bisher der Zeemaneffekt. Für diesen zeigt sich, daß zwar in den Linien eines Spektrums Gruppen vorkommen, die die gleiche Zerlegung aufweisen, insbesondere für die Linien einer Serie, daß jedoch im allgemeinen Größe und Art der Zerlegung von Linie zu Linie verschieden sind. Serienlinien zeigen meist komplizierte Zerlegungen (z. B. die eine der D-Linien in 6, die andere in 4 Komponenten, senkrecht zum Felde). Dabei besitzen homologe Serien innerhalb der Gruppen des natürlichen Systems (vgl. unten) gleiche Zerlegungstypen. Es bildet daher die Untersuchung des Zeemaneffekts ein wichtiges Hilfsmittel zur Prüfung zusammengehöriger Linien (Preston, Runge und Paschen). In vielen Fällen sind die Zerlegungen der Linien in einem Spektrum ganzzahlige Vielfache derselben Größe (Becquerel und Deslandres, Runge).

Die Bandenspektra verhalten sich verschieden. Bei einigen derselben sind Zeemaneffekt und Drehung der Polarisationsebene gefunden worden. Bei anderen sind alle bisherigen Versuche zur Auffindung magnetooptischer Effekte vergebens geblieben. In manchen Bandenspektren zeigen einzelne Linien magnetooptische Effekte, andere nicht. Die Mannigfaltigkeit der Beobachtungen läßt sich nicht in Kürze wiedergeben.

10k) Feinstruktur. Auch die Feinstruktur der Spektrallinien ist starken Aenderungen unterworfen. Es besitzen nicht nur die meisten Linien der Linienspektra individuelle Feinstrukturen, sondern es ändert sich auch die Zahl und die relative Intensität der Satelliten mit der Art der Leuchterregung und der Dampfdichte usw. Ob man in Bandenspektren von zusammengesetzten Linien sprechen kann oder ob jede Linie dort ein Individuum für sich bildet, ist noch unentschieden.

10l) Veränderlichkeit der Bandenspektra. Einer besonderen Bemerkung bedarf die Veränderlichkeit der Bandenspektra. Im Vergleiche zu den Linienspektren müssen die Bandenspektra (mit Ausnahme der Resonanzspektren) als relativ unveränderlich bezeichnet werden. Es gelingt nicht, ganze Gruppen von Linien zum Verschwinden zu bringen, vielmehr bedarf es zum Nachweis der Unterschiede feinerer Untersuchungen. Dann zeigt sich freilich, daß auch die Bandenspektra im Detail starken Veränderungen unterliegen. So ändert sich z. B. der Intensitätsverlauf in einzelnen Linienserien (vgl. weiter unten) mit dem Drucke und den gleichzeitig anwesenden Gasen sowohl in Absorption wie auch in Emission (Beispiele: positive Stickstoffbanden im Rot [Konen]; andere Banden [Hagenbach, Konen, Deslandres, Fabry, Buisson]). Oder der Verlauf der Einzelserien ändert sich in einer Weise, daß Minima der Intensität im Bandenverlaufe entstehen (Cy, Haferkamp) oder die Kanten gänzlich verschwinden. Regeln für diese komplizierten Details fehlen noch.

11. Resonanzspektra. Unter Resonanzspektren sind die Fluoreszenzspektra zu verstehen, die viele Gase und Dämpfe (z. B. Br, J, [Wood, Lommel], S, Se [Konen], Hg, Cd, Tl, Alkalien, zahlreiche organische Verbindungen) aussenden, wenn sie belichtet werden. Resonanzspektra können aus Linien oder Banden oder beiden zugleich bestehen. Ihre Zusammensetzung hängt von der Natur des auffallenden Lichtes und der anwesenden fremden Gase ab. Bei Anwesenheit fremder Gase und monochromatischer Anregung oder bei Belichtung mit weißem Lichte erscheinen vielfach komplizierte, den Absorptionsspektren ähnliche Spektra, vorausgesetzt, daß das anwesende fremde Gas die Fluoreszenz nicht gänzlich vernichtet (z. B. J). Bei Anregung durch Absorption in einzelnen Linien von Bandenspektren treten serienartige Folgen von Linien auf, deren Abstände in Wellenlängen gemessen nahezu konstant sind (Wood, vgl. weiter unten). Neuerdings hat sich gezeigt, daß in vielen Fällen die Beobachtungen dadurch kompliziert werden, daß die zur Anregung benutzten Linien mehrere Absorptionslinien überdecken, die außerordentlich nahe beisammen liegen (man vgl. den Artikel „Lumineszenz"; die Abbildung, auf die dort verwiesen wird, muß im Hinblick auf neuere Untersuchungen Wood's ausfallen).

Neben Bandenlinien werden auch Linien der Linienspektra durch Absorption innerhalb derselben Linie zur Emission gebracht. Dies gilt insbesondere für die Linien der Hauptserien der Alkalien. Dabei zeigt sich ein gewisser Zusammenhang mit den Bandenspektren der gleichen Elemente. Linien der Nebenserien (vgl. weiter unten) sind bisher nicht in Fluoreszenz nachgewiesen.

12. Fluoreszenz und Phosphoreszenz. Man versteht hierunter das Leuchten der Körper bei Belichtung oder nach Belichtung, ferner das Leuchten oder Nachleuchten bei Bestrahlung mit Röntgenstrahlen, Kathodenstrahlen, Kanalstrahlen, Strahlen radioaktiver Substanzen. Unter diesem Begriff wird eine Anzahl sehr verschieden-

artiger Prozesse zusammengefaßt, deren gemeinsames Kennzeichen nur in ihrer anscheinend starken Abweichung von den Gesetzen der Temperaturstrahlung liegt. Man bezeichnet daher die genannten Leuchterscheinungen zusammen mit einigen anderen, z. B. dem Leuchten der Körper beim Kristallisieren, Reiben usw. als Lumineszenz. Man vgl. die Artikel „Lumineszenz", „Fluoreszenz".

13. Gesetzmäßigkeiten in Spektren. Unter Gesetzmäßigkeiten im engeren Sinne versteht man die gesetzmäßigen Beziehungen zwischen den Schwingungszahlen der Linien, aus denen sich Emissions- oder Absorptionsspektra zusammensetzen. Man stellt zu diesem Zwecke ein Spektrum schematisch durch das System seiner Wellenlängen oder Schwingungszahlen dar. In diesem Zusammenhange kann man dann auch von Gesetzmäßigkeiten im Bau der Spektra sprechen. Wenn auch der Bau mancher Spektra, z. B. Bandenspektra, ohne weiteres den Eindruck einer gewissen Regelmäßigkeit macht, so hat es doch lange Zeit erfordert, bis es glückte, zahlenmäßige Ausdrücke für die zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten zu finden. Indes stimmen auch die bisher aufgestellten Regeln nur innerhalb gewisser Grenzen. Ferner ist es noch nicht geglückt, ein in weiterem Umfange brauchbares Modell für den Emissionsvorgang aufzustellen, aus dem sich die empirisch gefundenen bezw. bestätigten Regeln im Zusammenhang ableiten ließen. Es lohnt sich daher einstweilen noch nicht, an dieser Stelle die vorliegenden Theorien der Gesetzmäßigkeiten in Spektren zu diskutieren und es entspricht am besten dem jetzigen Stande unserer Kenntnisse, wenn man die bekannten Regeln unabhängig von allen Vorstellungen über den Emissionsvorgang beurteilt.

Man kann nun die Gesetze der Spektra einteilen nach folgenden Gesichtspunkten: a) allgemeine Regeln für Gesetzmäßigkeiten, b) Regeln für die Zusammenfassung einer Gruppe von Linien, c) Beziehungen derartiger Gruppen zueinander, d) Homologien zwischen den Spektren chemisch verwandter Elemente, Beziehungen zwischen chemischen und spektroskopischen Konstanten.

13a) Allgemeine Regeln. Es hat sich gezeigt, daß im allgemeinen die Gesetzmäßigkeiten in Spektren ihren einfachsten Ausdruck finden, wenn man sie auf Schwingungszahlen, nicht auf Wellenlängen bezieht. Es genügt vielfach, nicht immer, die Schwingungszahlen ohne Korrektion auf den leeren Raum zu benutzen. Dabei kann man unter Schwingungszahl die Zahl der Schwingungen pro Zentimeter, also $10^8/\lambda$ verstehen. Im sichtbaren Teil des Spektrums werden die Schwingungszahlen dann fünfstellig. Bei einer Genauigkeit von 0,01 A. in der Wellenlänge kann man somit die Schwingungszahlen nicht genauer als bis auf die sechste Stelle annehmen. Dies ist wichtig für die Beurteilung der Uebereinstimmung zwischen beobachteten und berechneten Schwingungszahlen.

Eine zweite allgemeine Regel bezieht sich auf den Charakter der gefundenen Gesetzmäßigkeiten. Dieselben weichen in ihrer Form durchaus ab von den gesetzmäßigen Beziehungen zwischen den Schwingungszahlen der aus der Mechanik bekannten elastischen Körper, können also z. B. nicht mit akustischen Schwingungen verglichen werden.

An dritter Stelle ist hervorzuheben, daß der Bau der Bandenspektra von demjenigen der Linienspektra vollkommen verschieden ist und zwar so, daß die Verschiedenheiten im Bau das sicherste Kriterium zu einer Unterscheidung zwischen Linien- und Bandenspektren liefern. Es muß daher die Besprechung der Gesetzmäßigkeiten beider Arten von Spektren im folgenden getrennt erfolgen. Versuche, gemeinsame Formeln für Linien- und Bandenspektra aufzustellen oder beide Arten von Formeln aus derselben Grundlage abzuleiten, müssen vorläufig als gescheitert betrachtet werden.

Endlich ist zu bemerken, daß bloße Zahlenbeziehungen nicht als Gesetzmäßigkeiten angesprochen werden können. Es hat sich vielmehr gezeigt, daß in allen Fällen den gesetzmäßigen Beziehungen zwischen Schwingungszahlen andere Beziehungen zwischen den betreffenden Linien entsprechen. So besitzen derartige Linien gleiche Zerlegung im Magnetfelde, gleiche Druckverschiebung, sie zeigen das gleiche Aussehen; sie sind in ihrer Intensität miteinander verbunden und dgl. mehr. Diese Aussage läßt sich, soweit bisher bekannt, auch umkehren, indem physikalischen Beziehungen der genannten Art in der Regel auch Beziehungen zwischen den Schwingungszahlen entsprechen.

Eine allgemeine Regel für die Beurteilung der Tragweite einer gegebenen Regel läßt sich wegen der verschieden genauen Definition der Wellenlänge der einzelnen Linien nicht aufstellen. Die Entscheidung ist von Fall zu Fall zu treffen und stößt oft auf gewisse Schwierigkeiten.

13b) Linienspektra. Zusammenfassung von Liniengruppen. Nachdem Balmer gezeigt hat, daß sich die Linien des Wasserstoffspektrums, wie man es unter gewöhnlichen Umständen erhält, mit großer Genauigkeit durch eine Formel darstellen lassen und nachdem Kayser und Runge sowie Rydberg ähnliche Regeln für zahlreiche Spektra nachgewiesen haben, kann man als allgemeines Ergebnis für Linienspektra aussprechen, daß die Zusammenfassung von Linien in sogenannten Serien zu erfolgen hat. Unter einer Serie versteht man eine Sequenz von Spektrallinien, die in einem genau begrenzten Teil des Spektrums liegen, durch ihre Eigenschaften als gleichartig gekennzeichnet sind, von einer gewissen Stelle ab in der Skala der Schwingungszahlen nach abnehmenden Wellenlängen hin immer näher zusammenrücken und zugleich an Intensität abnehmen. Mit Annäherung an eine bestimmte Wellenlänge, die Grenze der Serie, werden die Linien immer zahlreicher. Man nimmt an, daß ihre Zahl beliebig groß werden kann. Die größte Zahl — 49 — der Glieder einer Serie ist bisher am Absorptionsspektrum des Natriumdampfes beobachtet worden. Auch nach der Seite der längeren Wellen ist eine Serie begrenzt und zwar dadurch, daß eine Linie

der Serie die größte Wellenlänge unter allen Linien derselben Serie besitzt. Serien können in allen Teilen des Spektrums liegen. Sie können schnell und langsam konvergieren. Die Grenze liegt ausnahmslos nach der Seite der kürzeren Wellen. Figur 10

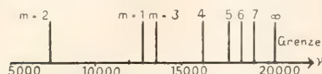


Fig. 10. Rb [S(m)]

charakterisiert den Verlauf einer Art von Serien, Figur 11 den Verlauf einer zweiten

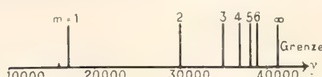


Fig. 11. Na [P(m)]

Art. Die angesetzten Ziffern bedeuten die Nummern (m) der Linien innerhalb der Serien. Als Abszissen sind Schwingungszahlen genommen (ν). Serien der bezeichneten Art findet man in den Spektren vieler Elemente und zwar meist in größerer Anzahl. Im Spektrum des Wasserstoffs kennt man z. B. vier derartige Serien, von denen die eine freilich bis vor kurzem nur im Spektrum gewisser Sterne beobachtet war. Die im Wellenlängenbereiche λ 6563 bis 3661 verlaufende, die bekannten Wasserstofflinien umfassende Serie wird innerhalb der Beobachtungsfehler genau durch die Balmersche Formel $\nu = A - N/(2 + m)^2$ dargestellt, wo m die Reihe der ganzen Zahlen durchläuft, N den Wert 109675 besitzt und $A = N/2^2$ ist. Je nach der Wahl der Normalen ändert sich der Wert von N etwas. Der angegebene Wert ist auf das Rowlandsche System bezogen und der ziemlich allgemein benutzte.

Bei anderen Elementen und anderen Serien paßt die Balmersche Formel nicht. Es sind hier im Laufe der Zeit verschiedene Formeln aufgestellt worden, von denen nur einige genannt seien:

Kayser und Runge:

$\nu = A - B/m^2 - C/m^3$ oder

$\nu = A - B/m^2 - C/m^4$

$\nu = A - B/m - C/m^2$ (m = 3, 4, 5, usw.)

Rydberg:

$\pm \nu = A - N/(\mu + m)^2$ (m = 1, 2 usw.)

Ritz:

$\pm \nu = A - N/(m + p + \pi/m^2)$ oder

$\pm \nu = A - N/(m + p + \pi(A - \nu))^2$

(m = 3, 4 usw. oder m = 1.5, 2.5 usw.)

Mogendorff-Hicks:

$\pm \nu = A - N/(m + p + \pi/m)^2$

Ritz-Lohuizen:

$\pm \nu = A - N/(m + p + \pi\nu)^2$.

In den Formeln von Kayser und Runge ist B ungefähr konstant. Rydberg stellt die Konstanz von N als Postulat auf. Das gleiche gilt für die übrigen Formeln, in denen p und π von Formel zu Formel wechselnde Konstanten bedeuten. Für größere Werte von m passen alle Formeln gleich gut. Für kleinere Werte versagen die Formeln von Kayser-Runge und Rydberg. Hier passen die übrigen Formeln besser. Sie geben bei einigen Elementen sehr guten Anschluß, z. B. bei den Alkalien. Bei anderen Elementen versagen sie jedoch auch für niedrige Werte von m. Die richtige Serienformel ist also wohl noch nicht gefunden. Auch läßt sich nicht sagen, welche der angeführten Formeln die beste ist. Zeichnet man die Serien verschiedener Elemente als Kurven, indem man die ganzen Zahlen als Abszissen, die Schwingungszahlen als Ordinaten einträgt und die Endpunkte durch eine Kurve verbindet, so erhält man Kurven, die sich durch Verschiebung und Drehung mit der Kurve der Wasserstofflinien zur Deckung bringen lassen. Dies bedeutet, daß die Formel für die Serien aus derjenigen der Wasserstoffserie durch lineare Transformation entstehen muß.

13c) Beziehungen von Linienserien. Man findet vielfach Serien einzelner Linien. In der Regel sind jedoch je zwei oder drei Serien miteinander verbunden. Man spricht dann von Paar-Serien und Triplet-Serien. In diesen Serien sind zwei Typen zu unterscheiden, Hauptserien und Nebenserien. Hauptserien sind dadurch gekennzeichnet, daß die Teilserien, aus denen sie sich zusammensetzen, dieselbe Grenze haben. So bilden je zwei oder drei Linien der gleichen Ordnungszahl der Teilserien Paare oder Triplets, deren Abstände mit wachsender Ordnungszahl schnell, etwa proportional der vierten Potenz der Ordnungszahl abnehmen. Außerdem enthalten die Hauptserien bei den meisten Elementen die stärksten und am meisten für ein Element charakteristischen Linien. Die Komponenten der Paare oder Triplets können verschiedenen Charakter und verschiedene Intensität haben. Der Abstand zwischen der ersten Linie eines Triplets und der zweiten, gerechnet im Sinne abnehmender Wellenlänge ist rund doppelt so groß, wie der Abstand zwischen der zweiten und der dritten Linie. Die Lage der Triplets kann jedoch auch die umgekehrte sein. Namentlich gilt dies für das erste Glied mancher Hauptserien. In Paarserien kann

ein Glied, in Tripletserien können zwei Glieder noch mehrere Komponenten besitzen. Die Hauptserien, auch Prinzipalserien oder Hauptzweigserien (Schuster) genannt, sollen im folgenden durch das Symbol $\pm \nu = P(m)$ bezeichnet werden, der veränderliche Teil von P(m), den man unter Zugrundelegung einer der Formeln erhält durch VP(m).

Die Nebenserien, auch Nebenzweigserien genannt, sind dadurch gekennzeichnet, daß in ihnen der Abstand der Glieder von Paaren und Triplets konstant bleibt. Außerdem sind die Linien der Nebenserien bei vielen Elementen, z. B. den Alkalien, weniger stark und hervortretend als die Linien der Hauptserie. Man kann die Nebenserien einteilen in erste Nebenserien [diffuse Serien D(m)], zweite Nebenserien [scharfe Serien S(m)], Bergmann-Serien [B(m)] — es ist strittig, ob diese Serien einen Typus für sich bilden —, und Kombinationsserien.

Die ersten Nebenserien können wie die Hauptserien aus einfachen Linien, Paaren oder Triplets bestehen. In den beiden letzten Fällen ist die erste, stärkste Linie eines Triplets dreifach, die zweite doppelt, die dritte einfach. Bei Paaren ist die erste Linie doppelt, die zweite einfach. Die Differenzen der Schwingungszahlen sind in beiden Serien konstant und in allen Paaren oder Triplets unter sich gleich, sowohl für D(m) wie für S(m). Bei den Alkalien sind die ersten Nebenserien wirklich diffuser als die zweiten. Erste und zweite Nebenserie treten immer zusammen auf und haben die gleichen (1 oder 2 oder 3) Grenzen. Die Komponenten der zusammengesetzten Linien, auch Satelliten genannt, verhalten sich zu der Hauptlinie wie die Komponenten der Paare und Triplets einer Hauptserie. Die B-Serien sowie die Kombinationsserien sind durch ihre Beziehungen zu den anderen Serien gekennzeichnet, wie sogleich zu zeigen sein wird. Man macht die Hypothese, daß je eine P(m), D(m), S(m) und B(m) zusammen ein Seriensystem bilden. P(m), D(m) und S(m) sind stets alle entweder Paar- oder Tripletserien. B(m) kann einfach oder zusammengesetzt sein.

Die verschiedenen Serien eines Seriensystems sind durch Beziehungen miteinander verknüpft, die zum Teil durch die bereits genannten, von Kayser und Runge gefundenen Regeln, zum Teil durch die Regel von Rydberg-Schuster gegeben sind, die die zweite Nebenserie mit der Hauptserie verknüpft. Eine Verallgemeinerung dieser Regeln ist das Kombinationsprinzip von Ritz, das die genannten Regeln mit umfaßt. Es ist daher am einfachsten, alle Regeln sogleich in geschlossener Form zu geben. Die vier Grundserien sind zunächst, wenn wir immer nur eine Linie der Paare oder Triplets ins Auge fassen, gegeben durch

$$P(m) = \pm (VS(1) - VP(m)) \quad (m = 1,2 \text{ usw.})$$
$$D(m) = \pm (VP(1) - VD(m)) \quad (\text{ev. } m = 0)$$
$$S(m) = \pm (VP(1) - VS(m))$$
$$B(m) = \pm (VD(1) - VB(m))$$

Will man den Bau eines Paar- oder Tripletsystems übersehen, so empfiehlt es sich, eine der Serienformeln zu benutzen und zur Abkürzung $N/(m + p + \pi(A - \nu))^2 = VP(m) = (m, p, \pi)$ zu setzen, wo p und π bei Paaren zwei, bei Triplets drei verschiedene Werte annehmen können. Aehnlich setzen wir $VD(m) = (m, d, \delta)$, $VD(m) = (m, s, \sigma)$ und $VB(m) = (m, b, \beta)$. Man hat dann für Paare

$$\pm P(m) = (1, s, \sigma) - (m, p_1, \pi_1) \quad p_1 < p_2$$
$$(1, s, \sigma) - (m, p_2, \pi_2) \quad \pi_1 < \pi_2$$
$$\pm D(m) = (1, p_2, \pi_2) - (m, d, \delta)$$
$$(1, p_1, \pi_1) - (m, d, \delta)$$
$$\pm S(m) = (1, p_2, \pi_2) - (m, s, \sigma)$$
$$(1, p_1, \pi_1) - (m, s, \sigma)$$
$$\pm D(m) = (1, d, \delta) - (m, b, \beta).$$

Nach Ritz ist hierbei $b = p_2 - p_1$; $\beta = \pi_2 - \pi_1$. Beide Werte sind nahe gleich Null, so daß (m, b, β) sich für höhere Ordnungszahlen m der Quotient (m, b, β) den Werten $\frac{N}{(2 + m)^2}$ des Wasserstoffspektrums nähert. Man sieht, daß außer der universellen Konstanten N bei Benutzung einer der genannten Serienformeln 9 Konstanten genügen, um ein ganzes Seriensystem darzustellen.

In Figur 12 ist der Bau eines Seriensystems an dem Beispiel des Kaliums graphisch erläutert. In Wirklichkeit sind die Serien P(m), S(m), D(m) alle Paarserien. Der Abstand beträgt jedoch nur 58 Einheiten, läßt sich somit in der Zeichnung nicht wiedergeben.

Der erste Term der obigen Formeln stellt jedesmal das konstante Glied, also die Grenze einer Serienformel dar. Die Form, in der dieses Glied auftritt, hat schon Rydberg zur Vermutung geführt, daß man die Seriensysteme mit zwei laufenden ganzen Zahlen schreiben müsse. Ritz hat dann diese Bemerkung zu seinem Kombinationsverfahren erweitert, das sich etwas verallgemeinert unter Benutzung der Angaben von Paschen und van Lohuizen wie folgt aussprechen läßt: Bezeichnen VP(m), VD(m), VS(m), VB(m) die gleichen Zahlen wie bisher, so erhält man die Serien eines Spektrums, indem man sämtliche Kombinationen VR(n)—VT(m) bildet, in denen R und T eine beliebige der oben genannten vier Serien bedeuten, n und m die Reihe der

ganzen Zahlen durchlaufen und m immer größer oder gleich n ist.

Man sieht leicht ein, daß die vier Grundserien in diesem Schema enthalten sind. Nebenserien die gleiche Grenze haben und daß die Komponenten der Hauptserie sich derselben Grenze nähern. Eine direkte Prüfung der übrigen Regeln ist nicht mög-

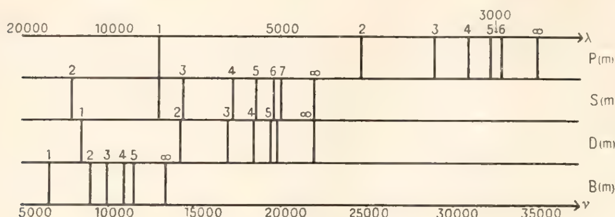


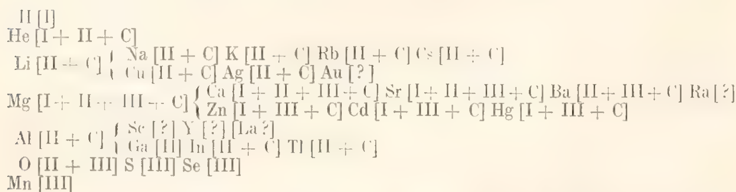
Fig. 12. Kalium.

Paschen und seine Schüler haben dann noch bemerkt, daß man in einem Spektrum, das mehrere Seriensysteme enthält, auch Kombinationen VR(n)—VT(m) bilden darf, in denen R und T Serien verschiedener Seriensysteme bedeuten.

Das Kombinationsprinzip ist in hohem Maße von der Form der benutzten Serienformel unabhängig. Es genügt, die Grenze einer einzigen Serie, z. B. der Hauptserie, zu kennen (hierzu ist in der Regel die Benutzung einer Formel erforderlich) und ferner die Schwingungszahlen der anderen Serien, wie sie experimentell gemessen werden. Weiß man dann noch (auf die Mittel, dies zu entscheiden, kann hier nicht eingegangen werden), ob die betreffenden Serien als P(m), D(m), S(m) oder B(m) anzusehen sind, so lassen sich alle anderen Kombinationen ohne weiteres bilden.

13d) Die im Vorstehenden kurz geschilderten Regeln werden von der Erfahrung in verschiedener Weise bestätigt. Durch direkte Messungen wird mit hoher Sicherheit erwiesen, daß die Abstände in den Nebenserien konstant sind, daß die lich, doch sprechen die vielfachen erfolgreichen Anwendungen durch Rydberg, Ritz, Paschen usw. dafür, daß man das Kombinationsprinzip in den wesentlichen Zügen für richtig ansehen muß. Die Erfahrung hat gezeigt, daß die Kombinationslinien um so schwächer werden, je höher die Ordnungszahlen n und m sind. Auch findet man nicht alle Arten der Kombinationen, die rein rechnerisch möglich wären. Einzelheiten müssen hier übergangen werden.

Seriensysteme der geschilderten Art sind in mehr oder minder großer Vollständigkeit in den Spektren zahlreicher Elemente gefunden worden. In der folgenden Aufzählung sind die Elemente nach den Kolonnen des natürlichen Systems geordnet. Es bedeutet I ein Seriensystem einfacher Linien, II ein Paarsystem, III ein Tripletsystem, C Kombinationsserien. Ein Pluszeichen deutet an, daß die betreffenden Seriensysteme in dem fraglichen Spektrum nebeneinander vorkommen. Von Unvollständigkeiten im einzelnen ist hier abgesehen. Auch ist in vielen Fällen die Deutung eines Systems zweifelhaft, ohne daß dies hier besonders hervorgehoben würde:


H [I]
He [I + II + C]
Li [II + C] { Na [II + C] K [II + C] Rb [II + C] Cs [II + C]
 Cu [II + C] Ag [II + C] Au [?]
Mg [I + II + III + C] { Ca [I + II + III + C] Sr [I + II + III + C] Ba [II + III + C] Ra [?]
 Zn [I + III + C] Cd [I + III + C] Hg [I + III + C]
Al [II + C] { Sc [?] Y [?] [La ?]
 Ga [II] In [II + C] Tl [II + C]
O [II + III] S [III] Se [III]
Mn [III]

[?] bedeutet, daß Serien gefunden sind, jedoch keine Seriensysteme. Außerdem sind einzelne Serien gefunden bei Sn[I], Sb[I] und Wiederholungen von Gruppen bei Ne, A, Kr, Pb, As, Bi, Ru, Rh, Pd, Eu, Ny = Ad.

Durch die erwähnten Seriensysteme und

die Kombinationen werden in vielen Spektren zahlreiche Linien aufgenommen, in einigen fast alle, die bekannt sind. In anderen Fällen ist die Zahl der durch Serien oder Serienkombinationen aufgenommenen Linien jedoch nur ein kleiner Bruchteil der bekannten Linien. Zugleich läßt sich zeigen, daß es unmöglich ist, gewisse in Serienspektren übrig bleibende Linien durch die Kombinationen der vorhandenen Serien aufzunehmen. Die Frage des Zusammenhangs dieser Nichtserienlinien unter sich und mit den Serienlinien muß daher noch als offen bezeichnet werden.

13e) Andere Gesetzmäßigkeiten in Linienspektren. Außer dem Serientypus kennt man noch eine zweite Art von Gesetzmäßigkeiten in Linienspektren, die in der Wiederholung von Liniengruppen mit konstanter Differenz der Schwingungszahlen besteht. Die Spektra der Edelgase und diejenigen von Bi, As, Sn, Sb bieten Beispiele hierfür. Ob diese Art der Gesetzmäßigkeit einen allgemeineren Typus darstellt oder bei weiterer Forschung sich mit dem Serienbau in Zusammenhang bringen lassen wird, läßt sich zurzeit nicht sagen.

Von theoretischen Ansätzen zur Veranschaulichung der seltsamen Gesetze der Linienspektra scheint bisher nur derjenige von Ritz beachtenswert, der in den Atomen konstituierende Magnetfelder annimmt und die Bewegung von Elektronen in diesen Feldern untersucht. Doch stößt der Ritzsche Ansatz bei Erklärung des Zeemaneffektes auf Schwierigkeiten.

Für zahlreiche Linienspektra ist keine Gesetzmäßigkeit irgendwelcher Art bekannt.

13f) Homologien. Innerhalb der Untergruppen des chemischen Systems zeigen sich Homologien der Linienspektra, die bereits in der Uebersicht über die gefundenen Seriensysteme zum Ausdruck kommen. So besitzen z. B. alle Alkalien Paarsysteme. Geht man in einer Gruppe von niedrigem zu höherem Atomgewicht, so rücken mit steigendem Atomgewicht die analogen Seriensysteme nach längeren Wellen, wie man am einfachsten an den Grenzen der Serien erkennt. Diese Verschiebung nach längeren Wellen betrifft jedoch die Teilserien eines Seriensystems nicht in gleicher Weise. Zunächst wandern die Hauptserien in der Regel schneller als die Nebenserien. Die B-Serie macht in einigen Gruppen Ausnahmen, indem ihre Grenze mit steigendem Atomgewicht nach größeren Schwingungszahlen rückt, z. B. bei den Alkalien. Auch finden sich bei den anderen Serien zahlreiche Ausnahmen, z. B. bei Sr, Cd usw.

Man hat ferner versucht, entweder die Abstände der Paare bezw. Triplets oder die Konstanten der Serienformeln in Beziehungen zum Atomgewicht zu setzen, da sich zeigt, daß diese Abstände im allgemeinen um so weiter sind, je höher das Atomgewicht des betreffenden Elementes ist. So haben Kayser und Runge die Regel aufgestellt, daß die Schwingungsdifferenzen der Paare bezw. Triplets jedesmal dividiert durch das Quadrat des Atomgewichtes in jeder Gruppe des Systems angenähert konstante Werte liefern. Diese Regel gilt jedoch nur in erster Annäherung. Ferner haben Kayser und Runge nach Beziehungen ihrer Formelkonstanten zu dem Atomgewicht gesucht, dabei aber nur gefunden, daß die Seriensysteme zu immer kürzeren Wellenlängen rücken, wenn man zu höheren Kolonnen des Systems übergeht. Innerhalb jeder Kolonne gilt die bereits erwähnte Regel. Dann hat Ritz gefunden, daß das Quadratgesetz genauer gilt, wenn man statt der Schwingungszahldifferenzen selbst die Differenzen $p_1—p_2$ der Konstanten der Ritzschen Hauptserienformeln benutzt. Runge und Paschen haben die Regel aufgestellt, daß der Logarithmus der Abstände homologer Paare oder Triplets eine lineare Funktion des Logarithmus des Atomgewichtes ist. Allein diese Regel hat sich beim Radium nicht bestätigt. Andere Versuche, Regeln aufzustellen, seien übergangen (Reinganum, Bernouilli, Watts). In neuester Zeit hat Hicks die B-Serien in Beziehung gesetzt zum Atomgewicht. Ein abschließendes Urteil über diese Regel ist noch nicht möglich. Man muß daher im ganzen sagen, daß eine einfache und exakte Beziehung zwischen den Serienkonstanten und dem Atomgewicht noch nicht gefunden ist.

13g) Bandenspektra. Während für die Linienspektra eine Reihe von Gesetzen bekannt sind, die mit großer Genauigkeit gelten, fehlen ähnliche Gesetze bisher noch für die Bandenspektra. Schon der äußere Anblick lehrt, daß die aus Linien zusammengesetzten Bandenspektra bedeutend mannigfaltiger gestaltet sind als die Linienspektra. Fast von allen Elementen sind zum Teil mehrere Bandenspektra bekannt. Dazu kommen noch die Spektra der Verbindungen. In dieser ungeheueren Mannigfaltigkeit von Spektren sind zahlreiche verschiedene Typen vertreten, zu deren Unterscheidung es bisher noch an Kriterien mangelt. Man kennt z. B. Spektra, die kanneliertes Aussehen aufweisen und in denen man eine größere Zahl von Kanten unterscheiden kann. Diese Kanten sind Stellen, an denen sich starke Linien häufen. Sie sind jedoch nicht Häufungsstellen von Linien im Sinne der Grenzen der Linienserien. Vielmehr wird jede Kante bei ge-

nauerer Untersuchung stets von einer ganz bestimmten Zahl von Linien gebildet. Bei roher Beobachtung scheint es, als ob von der Kante nach einer Seite hin die Intensität plötzlich abfalle. Nähere Untersuchung zeigt dann jedoch in der Regel, daß der stärksten Linie an einer Kante mehrere schwächere Linien vorangehen. Von der Kante aus nehmen dann die Intensitäten der Linien nach einer bestimmten Seite im Spektrum ab, indes keineswegs immer gleichmäßig. Vielmehr beobachtet man in manchen Fällen ein Ansteigen und Absteigen der Intensität. In den Linien, die von einer Kante ausgehen, kann man Reihen von Linien unterscheiden, die dadurch als zusammengehörig erkannt werden können, daß die zweiten Differenzen ihrer Schwingungszahlen nahezu konstant sind. Auch solche Linienfolgen nennt man Serien. Zahlreiche Untersuchungen haben jedoch gezeigt, daß die zuerst von Deslandres aufgestellte Regel der Konstanz der zweiten Differenzen der Schwingungszahlen nicht streng gilt. Häufig nehmen die Differenzen von einer gewissen Stelle an ab und es scheint, als ob die betreffende Serie (im engeren Sinne) dann nach einer zweiten Kante hin konvergiere. Die Zahl der Glieder einer Serie kann sehr groß sein· es sind mehrere Hundert beobachtet worden. Doch scheint es, daß es sich in jedem Falle um Gruppen handelt, die sich aus einer endlichen Zahl von Linien zusammensetzen. Es ist zweifelhaft, ob die durch eine angenäherte Formel dargestellten Serien der Bandenspektra in dem gleichen Sinne wie bei den Linienspektren die Bedeutung haben, daß die so zusammengefaßten Linien auch physikalisch als zusammengehörig zu betrachten sind. Auch die Schwingungszahlen der Kanten lassen sich nach Deslandres zu arithmetischen Reihen vereinigen. Diese Regel ist ebenfalls an vielen Spektren geprüft worden und hat sich in weiteren Grenzen bestätigt als die erstgenannte. Nach Deslandres sollte man die Linien und Kanten eines Bandenspektrums durch eine Formel:

$$\nu = f(n^2, p^2) . m^2 + Bn^2 + \varphi(p^2) \quad \left.\right\} \begin{matrix} n\ p\ m \\ \text{ganze Zahlen} \end{matrix}$$

oder angenähert:

$$\nu = Am^2 + B \text{ (Bande)}$$
$$\nu_1 = A_1m^2 + B^1 \text{ (Kanten)}$$

darstellen können. Ritz versucht die Formel $\nu = a + bm^2 + cm^4$. Thiele hat kompliziertere Formeln aufgestellt. Allein alle diese Formeln stimmen nur bei einigen Spektren innerhalb beschränkter Intervalle. Bei anderen Spektren ist der Bau ein total anderer. Hier genügen die bisherigen Messungen überhaupt nicht, um ein Bild der Zusammensetzung zu liefern. Dies gilt z. B. von dem positiven Stickstoffspektrum (langwellige Banden), von dem Bandenspektrum des Schwefels, demjenigen von Na, J u. a., die Hunderttausende von Linien umfassen, die äußerst eng zusammenliegen. Andere Spektra, z. B. diejenigen von CaO und anderen Verbindungen besitzen anscheinend weder Kanten noch Serien. Wieder andere Banden sind zweiseitig abschattiert usw. Nach neueren Untersuchungen über Absorptions- und Fluoreszenzspektra scheint es möglich, daß es in den Bandenspektren Serien gibt, die aus Reihen von Linien bestehen, deren Abstand in der Skala der Wellenlängen nahezu konstant ist und die zugleich als physikalisch zusammengehörig betrachtet werden müssen. Es fehlt an Raum hierauf einzugehen.

Noch geringer sind unsere Kenntnisse über den Bau der Bandenspektra der Verbindungen im Hinblick auf die chemische Zusammensetzung der Körper. Man besitzt nicht einmal ein Kriterium, um das Spektrum einer Verbindung von demjenigen eines Elementes zu unterscheiden. In einigen Fällen sind Homologien zwischen den Bandenspektren analoger Verbindungen bekannt (Olmsted).

Man besitzt zahlreiche Theorien für die Entstehung der Bandenspektra. Da man sie bisher nicht prüfen konnte, so lohnt es sich nicht, sie hier zu besprechen.

14. **Spektroskopische Theorien.** Im allgemeinen sei auf die Artikel „Strahlungsumwandlungen", „Lumineszenz", „Magnetooptik", „Farbe", „Absorption" verwiesen, da sich eine Theorie der Spektroskopie nicht außer Zusammenhang mit den Fragen betreffend Konstitution der Materie und der Strahlung behandeln läßt. Zudem ist zu bedenken, daß die Beziehungen der spektroskopischen Eigenschaften zu den chemischen Eigenschaften der Körper ohne bestimmte Bilder von diesen kaum theoretisch gefaßt werden können. Man hat zunächst versucht, große Teile der Spektroskopie nach dem Muster der für die schwarze Strahlung bewährten Methoden zu behandeln, d. h. gewisse Seiten der Erscheinungen unter Zuhilfenahme des Temperaturbegriffes und der allgemeinen Strahlungsgesetze miteinander in Verbindung zu bringen. Bei der Emission kontinuierlicher Spektra und vielen Absorptionserscheinungen ist dies in der Tat bis zu einer gewissen Grenze gelungen. Dieser Teil der spektroskopischen Theorien läßt sich unter Benutzung des Kirchhoffschen Gesetzes und von Analogien mit den Gesetzen der schwarzen Strahlung auch einigermaßen quantitativ gestalten. Sobald man jedoch die Veränderlichkeit der Spektra und den Bau der Spektra berücksichtigen will, kommt man auf diesem Wege nicht weiter. In älterer Zeit hat man versucht, mechanische Analogien heranzuziehen. Diese Ueberlegungen sind heute gänzlich verlassen. Dann hat Lockyer in seiner Dissoziationstheorie versucht, die Veränderungen eines Spektrums durch Zerfall der Atome in

Teile mit speziellen Eigenschaften zu erklären. Die Entwickelung der Ionen- und Elektronentheorie, speziell auch die Entwickelung der Lehre von der Radioaktivität hat den Annahmen Lockyers eine Grundlage gegeben, so daß heute wohl allgemein die Ueberzeugung herrscht, daß die Atome oder Moleküle eines Gases in verschiedenen Zuständen (z. B. verschiedenen Zuständen elektrischer Dissoziation) in dynamischem Gleichgewicht emittieren. Die Entwickelung der Elektronentheorie, insbesondere die Entdeckungen Zeemans führten weiter zu dem Schlusse, daß, für die Linienspektra zum mindesten, der Sitz der in den Spektren sichtbar werdenden Schwingungen in den in den Atomen bezw. Molekülen vorhandenen Elektronen zu suchen sei. Die Absorptionserscheinungen und Dispersionserscheinungen haben weiter vielfach zu der Annahme geführt, daß die Dispersionselektronen mit den schwingenden Elektronen des Zeemaneffektes identisch seien. Gibt man dies zu, so kann man angenäherte Abschätzungen der Zahl der in einer Volumeinheit enthaltenen schwingenden Teile vornehmen und findet dann, daß die relative Anzahl der unter gegebenen Verhältnissen leuchtenden und absorbierenden Teilchen jedesmal sehr gering und für verschiedene Linien und Banden verschieden ist. Man würde danach also als die Meinung der Mehrzahl der heutigen Spektroskopiker etwa aussprechen können, daß in einem leuchtenden oder absorbierenden Gase stets nur eine gewisse (relativ geringe) Anzahl der vorhandenen Moleküle sich in einem absorptionsfähigen bezw. emissionsfähigen Zustande befindet, und daß während der Absorption bezw. Emission die Elektronen innerhalb der Atome, vielleicht auch innerhalb der Moleküle (Ultrarot) Schwingungen ausführen. Hier knüpfen nun die weiteren Hypothesen an. Einige sind der Meinung, daß man zwischen den Dispersionselektronen und denjenigen, die man den chemischen Affinitäten zuschreibt, unterscheiden müsse, daß es demnach verschiedene Arten der Emission gebe. Weiter nehmen einige an, daß die Atome, die Linienspektra, speziell Serien emittieren, durch Abgabe von negativen Elektronen positiv geladen seien, während andere der gegenteiligen Meinung sind oder nur für gewisse Liniengruppen, z. B. für Nebenserien, geladene Emissionszentren annehmen. Ueber die Art der Anregung der Elektronen zu Schwingungen gehen weiter die Meinungen gänzlich auseinander. Z. B. werden die Stöße der Moleküle als Ursachen der Elektronenschwingungen angesehen, die je nach der Konstitution des Moleküls (Element, allotrope Modifikation, Ion, Verbindung) unter verschiedenen Kräften stattfinden. Oder es wird angenommen, daß zur Emission negative Elektronen ganz oder teilweise abgelöst werden müssen und daß dann die verschiedenen Prozesse der Elektronenabspaltung oder Rekombination die verschiedenen Arten der Emission geben. Oder man nimmt an, daß die Emission erfolge, wenn ein Molekül von einem freien Elektron getroffen werde (z. B. in Kathodenstrahlen) und daß die Stärke des Stoßes die Art der Emission bedinge. Derartige Bilder sind von einigen, z. B. von Stoney, J. J. Thomson, Hemsalech, Deslandres, J. Stark u. a. bis ins einzelne ausgemalt worden, ohne jedoch eine allgemeinere Annahme zu finden. Die Mannigfaltigkeit der Linien eines Linien- oder Bandenspektrums wird ebenfalls auf verschiedene Weise gedeutet. Man nimmt z. B. an, daß die Linien eines Spektrums, z. B. einer Serie, ein und demselben Zentrum angehören und den verschiedenen Freiheitsgraden der schwingenden Elektronen entsprechen. Dann würde man auch bei linienreichen Elementen immer nur eine begrenzte Zahl von verschiedenen schwingenden Gebilden haben. Auf der anderen Seite nehmen manche an, daß jede Linie, z. B. auch jedes Glied einer Serie besonderen Zuständen eines schwingenden Atoms entspreche, so daß man ebensoviel Schwingungszentren wie Linien haben würde. Andere nehmen wieder eine vermittelnde Stellung zwischen beiden Extremen ein.

Auch über die Intensität der Anregung herrschen verschiedene Meinungen. Während von manchen angenommen wird, daß ein schwingendes Elektron bezw. ein schwingendes Molekül verschiedener Grade der Anregung fähig sei, sind andere der Meinung, daß hauptsächlich die Zahl der schwingenden Gebilde in der Volumeinheit die Intensität der Emission bedinge, ohne daß die Schwingungen eines einzelnen Emissionszentrums starken Aenderungen unterworfen sind.

Endlich sind auch über den Mechanismus des Schwingens der Elektronen im Molekül oder im Atom verschiedene Theorien aufgestellt worden. Während z. B. von H. A. Lorentz angenommen wird, daß ein Elektron im Atom quasielastischen Kräften unterliege, nimmt Ritz an, daß sich in den Atomen bestimmte Arten von Magnetfeldern befinden, in denen die Bewegung der Elektronen verläuft (man vgl. den Artikel „Magnetooptik").

Es ist hier nicht möglich, alle diese verschiedenen Ansichten gegeneinander abzuwägen. In der Regel deuten die einzelnen Theorien gewisse Beobachtungen ganz befriedigend, versagen aber gegenüber anderen Erscheinungen. Ob es möglich sein wird, auf den jetzt eingeschlagenen Wegen zu einer befriedigenden Theorie mit quantitativen Voraussagen zu gelangen, muß sich erst noch zeigen.

15. **Spektroskopie einiger Lichtquellen der Laboratoriumspraxis.** 15a) Bogenspektra. Bogenspektra erzeugt man durch Gleichstrom- oder Wechselstrombogen zwischen Metall- oder Kohlenelektroden. Im letzteren Falle sind die zu prüfenden Substanzen auf eine der Elektroden aufzutragen. Mit Gleichstrom mäßiger Spannung (70 bis 110 V.) und Stromstärken von 10 bis 20 A. erhält man intensive Linienspektra gemischt mit Banden. Die Linien der Serien sind dann intensiv; besonders bevorzugt ist das Ultrarot, Rot und Blau, während das Ultraviolett verhältnismäßig schwach ist. Man erhält starke Verbreiterungen der Linien und viele Umkehrungen, zumal im Ultraviolett (hier nur die Funkenlinien ausgenommen). Bei höherer Spannung und kleinerer Stromstärke erhält man nicht die schwächsten Linien, dafür sind die anderen Linien schärfer. Neben Metallen wie Fe, Ni, Cr, Ca Mg, Zn, Cd, Cu, Ag, Pb, Sn, Al, Tl usw. kommen hauptsächlich Kohlenelektroden zur Herstellung von Spektren in Frage. Im Wechselstrombogen sind die Erscheinungen während verschiedener Phasen verschieden; man erhält daher ein Gemisch verschiedener Spektren.

Neben den Linien der Elemente, speziell der Metalle, erhält man im Bogen zahlreiche Bandenspektra, insbesondere in der äußeren Hülle, bei Benutzung von Kohlenelektroden außerdem die zahlreichen und störenden Bandenspektra der Kohle (Cy, C, CO?). Diese letzteren treten jedoch je nach der untersuchten Substanz mit verschiedener Helligkeit auf. Bei manchen Elementen, z. B. den Alkalien, können sie sehr schwach werden. Auch die Elemente der Luft beteiligen sich an der Emission des Bogens. Man findet daher Bandenspektra des Stickstoffs und seiner Verbindungen, ferner die Spektra des Wasserdampfs, des Wasserstoffs, der Kohlensäure in fast allen Bogenspektren. Dazu kommen beim Kohlenbogen zahlreiche Verunreinigungen. Auch bei gereinigten Elektroden ist kaum ein Spektrum irgendeines Körpers als Verunreinigung ausgeschlossen. So findet man insbesondere Si, Fe, Hg, Ca, Cu, Mg, Li, Na, aber auch seltenere Elemente in jedem Spektrum eines Kohlenbogens. Neben den Spektren der Metalle erhält man auch zahlreiche Spektra von Metalloiden, z. B. As, Te, Br, P, B u. a., doch treten die Metalloidspektra im allgemeinen gegen diejenigen der Metalle zurück. Die Emission der verschiedenen Teile eines Bogens ist sehr verschieden. Während man im Kerne eines Bogens zwischen Metallstäben alle Linien mit großer Intensität wahrnimmt, findet man in den äußeren Hüllen besonders Bandenspektra und nur die stärkeren Linien, also namentlich die ersten Linien der Hauptserien. Man hat geglaubt, den Bogen in Hüllen mit verschiedenem Emissionsvermögen einteilen zu können derart, daß z. B. eine jede Hohlflamme eine bestimmte Serie emittiert. Neuere Untersuchungen haben jedoch diese Annahme nicht bestätigt. In der Richtung von einer Elektrode zur anderen findet man gleichfalls starke Unterschiede der Emission. Namentlich findet man zahlreiche Linien, besonders im Ultraviolett, die an beiden Elektroden oder an einer Elektrode verstärkt sind (häufig, nicht immer, an der negativen.) Unter Umständen kann man an einer Elektrode ein vollständiges Funkenspektrum beobachten (z. B. Silber). Bisher haben sich die Spektra aller Metalle und diejenigen vieler Metalloide im Bogen erhalten lassen. — Statt bei gewöhnlichem Drucke in Luft kann man Bogen auch bei erhöhtem oder vermindertem Drucke in anderen Gasen oder im Dampfe eines Metalls brennen lassen. Man erhält so z. B. die Metalldampflampen, von denen die Quecksilberlampe die meist benutzte ist. Bei sehr niedrigem Drucke werden die Linien besonders scharf (Janicki). Endlich liefern die Elektroden der Bogen kontinuierliche Spektra, von denen nur wenig bekannt ist, abgesehen vom Kohlenbogen. Das Licht der farbigen Bogenlampen der Technik (Effektkohlen) rührt der Hauptsache nach von den Bandenspektren gewisser Verbindungen her.

15b) Funkenspektra. Eine ähnliche Mannigfaltigkeit wie die Bogenspektra zeigen die Funkenspektra, die durch allmähliche Uebergänge aus den Spektren der Wechselstrombogen entstehen. Alle Metalle und die meisten Metalloide liefern Funkenspektra. Um die Spektra der Metalloide im Funken zu erhalten, bringt man geschmolzene Salze auf eine Elektrode (de Gramont). Die Funkenspektra sind besonders linienreich im Ultraviolett. Die Serienlinien treten relativ in ihnen zurück. Es ist wiederholt behauptet worden, daß man die Serienlinien in Funken ganz auslöschen könne. Doch fehlt bisher ein sicherer Beweis dafür. Im Funken findet man gewisse Linien besonders stark (verstärkte Linien oder enhanced lines). Auch im Funken sind die Spektra der Hüllen und des Kernes, ferner die Spektra der Teile in der Nähe der Elektroden und der Mitte, sowie endlich die Spektra verschiedener Phasen stark verschieden. In der Peripherie der Funken findet man Aureolen, die Banden- und Linienspektra der benutzten Metalle und der umgebenden Atmosphäre aussenden, über die noch wenig bekannt ist (Hertz, Matthies, Strutt, Fowler). Die Ansatzpunkte des Funkens an den Elektroden sind besonders linienreich, der Kern sendet in der Regel das Linienspektrum der benutzten Substanz aus. Die Initialentladung liefert verschiedene Linienspektra der umgebenden Atmosphäre (Watteville), die späteren, oszillierenden Entladungen geben die Linien der Metalldämpfe. Dies alles bezieht sich auf die Entladungen großer Kondensatoren mit geringer Selbstinduktion im Stromkreis und Abreißfunken (gekühlte Elektroden, Luftstrom oder dergl.). Als Verunreinigung der erhaltenen Funkenspektra findet man dann die Linien der fremden Elemente, auch wenn sie nur spurenweise anwesend sind, sowie die Linien der Bestandteile der Luft (N, O, A, H, C, Elemente des Staubes, z. B. Cu). Die Reaktion ist vielleicht noch empfindlicher als diejenige im Bogen. Bei Einleitung weniger gedämpfter Schwingungen (kurze Funkenstrecke, große Selbstinduktion, heiße Elektroden usw.) treten die Linienspektra zurück und man erhält eine Art von Wechselstrombogen, in dem die Banden der Bestandteile der Luft und ihrer Verbindungen sowie die Bandenspektra der untersuchten Elemente neben den „Restlinien" (de Gramont) sichtbar werden. Die Funkenspektra reichen ins äußerste Ultraviolett und besitzen dort erhebliche Intensität (Schumann, Pflüger).

15c) Flammenspektra. Neben dem Bunsenbrenner in seinen zahlreichen Formen besitzen das Leuchtgas-Sauerstoffgebläse oder das Wasserstoff-Sauerstoffgebläse Wichtigkeit für die Praxis. In der Technik kommen noch die Flammen bei metallurgischen Prozessen, z. B. beim Bessemerprozeß in Frage. Die Flammen des verbrennenden Stickoxyduls, des Schwefels, Phosphors oder die Haloid-Wasserstoffflammen besitzen besondere Eigenschaften, auf die hier nicht eingegangen werden kann. Je heißer eine Flamme im gewöhnlichen Sinne ist, um so intensiver ist in der Regel das Spektrum, das sie liefert, und um so größer ist die Zahl der Elemente und Verbindungen, die in ihr Spektra liefern. So gibt es kaum ein Metall, das nicht in einer H-O-Flamme charakteristische Linien und Bandenspektra gäbe. In vielen Fällen folgt die Emission der Flammen ähnlichen Gesetzen wie die Temperaturstrahlung. In anderen Fällen wird dies bestritten. Die Verteilung der Emission in den verschiedenen Teilen einer Flamme, z. B. den Teilen einer Bunsenflamme ist eine sehr verschiedene. Während man in den äußeren Teilen und in der Verbrennungszone in der Regel nur die stärksten Linien eines Elementes mit erheblicher Intensität erhält, findet man in der Reduktionszone (dem inneren Kegel) intensive, weit ins Ultraviolett reichende Spektra vieler Körper, z. B. des Eisens, die den Bogen-

spektren sehr ähnlich sind. Außer den Metallen geben auch viele Metalloide, z. B. Stickstoff, Phosphor, Wasserstoff, Arsen u. a. charakteristische Flammenspektra. Man hat, ähnlich wie in Bogen, in Flammen verschiedene Schichten unterscheiden wollen, die nur bestimmte Teile eines Spektrums, z. B. nur die Hauptserie oder eine der Nebenserien eines Alkalimetalls aussenden. Allein dies hat sich nicht bestätigt.

Außer den Linienspektren und zahlreichen Verbindungsspektren erhält man in Flammen auch charakteristische Glühspektra mancher Körper, z. B. von Salzen (farbiges Glühen, Lenard) oder Gemischen (Didymglas).

Ueber die Spektra der geprüften Körper lagern sich die Spektra der Flammen selbst. Beim Bunsenbrenner ist das Eigenspektrum der Flamme sehr kompliziert und in verschiedenen Teilen der Flamme verschieden. So liefert der untere Teil (mit Einschluß des inneren Kegels) das ultrarote Spektrum der Kohlensäure und des Wasserdampfes, ferner das ultraviolette Spektrum des Wasserdampfes, das Bandenspektrum der Kohle (oder des CO?, sogenanntes Swanspektrum), ferner ein kompliziertes Bandenspektrum, das einer Kohlenwasserstoffverbindung zugeschrieben wird und endlich die Banden einer N-O-Verbindung (sogenanntes Ammoniakspektrum). Endlich soll die Flamme auch noch ein schwaches kontinuierliches Spektrum liefern. Auch die Flammenreaktionen sind sehr empfindlich und zwar um so mehr, je niedriger der Schmelzpunkt eines Metalls und die Dissoziationstemperatur seiner Verbindungen liegt. Verbindungen, die in einer gegebenen Flamme nicht dissoziiert werden, liefern nur Bandenspektra.

15d) Geißlerröhren. Die größte Mannigfaltigkeit herrscht in der Emission der Geißlerröhren, je nach Gasdruck, Betriebsart, Form, absoluter Größe, Reinheit der Füllgase. Eine Diskussion dieser Punkte ist hier nicht möglich, zumal sie im Zusammenhang mit den Eigenschaften der Röhren hinsichtlich der Entladungserscheinungen erfolgen müßte. In Geißlerröhren findet man jede erdenkliche Art der Verunreinigung, die aus den Wänden der Röhren, den Elektroden und den Füllgasen selbst herrühren können, in der Regel Hg, N, Cy, CO, Na, S, Cl, ferner Si, Al, C. Durch Einwirkung von Alkalimetalldämpfen, äußerstes Evakuieren unter Benutzung aller zur Verfügung stehenden Hilfsmittel sucht man Füllungen mit reinen Gasen zu erzielen. Je nach dem Drucke erhält man Funken-, Bogen- oder Glimmentladungen, die nun von Fall zu Fall verschiedene Spektra aufweisen. Man kann auch Salze in Röhren einführen und die zu untersuchenden Elemente durch Dissoziation der Salze in der Entladung selbst entwickeln. Die auftretenden Spektra können jedem Typus angehören. In der Regel gleichen sie den Funkenspektren, doch hängt dies von dem Röhrenquerschnitt, der vorhandenen Kapazität, etwaigen Funkenstrecken usw. ab. Man erhält meist in weiten Röhren bei Gleichstrombetrieb Bandenspektra oder Gemische von Banden und Linienspektren, in engen Röhren und bei Benutzung stark kondensierter Entladungen Linienspektra. Mit der Stromintensität wächst die Intensität der Emission, allein für verschiedene Banden und Linien nach verschiedenen Gesetzen. Es kann auch geschehen, daß von einem bestimmten Werte der Stromintensität ab eine Umwandlung des Spektrums in ein anderes einsetzt. Auch Verbreiterungs- und Umkehrungserscheinungen sind in Geißlerschen Röhren oft wahrzunehmen. Neben Linien- und Bandenspektren beobachtet man auch kontinuierliche Spektra, namentlich bei höheren Drucken. In verschiedenen Teilen derselben Röhre pflegen die Spektra verschieden zu sein, entweder so, daß die Füllung verschiedene Spektra liefert oder daß bei Gasgemischen die Bestandteile in verschiedenen Teilen verschieden hervortreten. An der Kathode, aber auch an der Anode, beobachtet man häufig besondere Linien- oder Bandenspektra. Desgleichen zeigen sich im Bereiche von Kathoden-, Kanal- oder Anodenstrahlen besondere Spektra (vgl. die Artikel „Kathodenstrahlen", „Kanalstrahlen", „Anodenstrahlen"). An der Anode beobachtet man vielfach bogenspektrumähnliche Emissionen. In Nebengefäßen, die mit Geißlerschen Röhren in Verbindung stehen, zeigen sich besondere Leuchterscheinungen mit eigentümlichen Spektren (Hertz, Matthies, Stark, Strutt, Fowler). Bei geeigneter Anordnung ist die Spektralreaktion in Geißlerschen Röhren gleichfalls nahezu unbegrenzt empfindlich. Eine Anzahl von Elementen sind so zuerst nachgewiesen worden, z. B. Argon, Helium, Neon. Die Empfindlichkeit der Reaktion hängt jedoch von Nebenumständen ab.

16. **Spektroskopie der Himmelskörper.** Neben den irdischen Lichtquellen sind seit Beginn der Spektroskopie die kosmischen eingehend und mit größtem Erfolge spektroskopischen Untersuchungen unterworfen worden. Hier müssen kurze Notizen genügen. Für weiteres wird auf die angegebene Literatur verwiesen.

16a) Erde. Die Absorption der Erdatmosphäre hat für alle spektroskopischen Arbeiten größte praktische Bedeutung. Unterhalb 3000 λ etwa scheint die Erdatmosphäre keine Strahlen durchzulassen, wenn ihre ganze Dicke absorbiert. In dünneren Schichten und schon bei geringen Drucken ist sie unterhalb λ 1800 undurchsichtig. Schon bei λ 2000 wird die Absorption sehr stark. Im Bereiche des sichtbaren Spektrums besitzt die Luft eine Reihe von Absorptionsbanden (terrestrische Linien des Sonnenspektrums), die teils dem Wasserdampf, teils dem Sauerstoff, teils der Kohlensäure zugeschrieben werden und sich ins Ultrarot fortsetzen, soweit dasselbe untersucht ist. Im Sichtbaren liegen diese Banden und Linien im Bereiche λ 7450 bis 4981. Wie die Linien im einzelnen dem O oder H_2O zuzuordnen sind, ist vielfach strittig. Die Banden bei 759, 687, 627, 578, 538 werden allgemein dem O zugerechnet.

Im Ultrarot hat man bis etwa 20 μ Banden des Wasserdampfes, ferner zwei Absorptionsbanden der Kohlensäure, sowie zwei Banden des Ozons gefunden. Einen weiteren spektroskopischen Aufschluß über die Atmosphäre der Erde würden die Spektra des Blitzes und des Nordlichtes liefern können. Sie sind jedoch nur ungenau bekannt. Im Blitzspektrum scheinen Wasserstofflinien aufzutreten. Im Spektrum des Nordlichtes findet man vielleicht Linien des Kryptons oder unbekannter Körper (vgl. den Artikel „Polarlicht").

16b) Sonne. Die Spektroskopie der Sonne

ist in dem Artikel „Physik der Sonne" ausführlich dargestellt; man vgl. insbesondere den Abschnitt 5 u. f. Es seien daher hier nur einige Bemerkungen angefügt. Das Spektrum der Sonne reicht je nach Jahreszeit, Ort und Witterung in Meereshöhe von etwa 5 μ bis 3000 A. Diese Grenzen schwanken etwas. Auf kontinuierlichem Grunde sieht man im ganzen Spektrum dunkle Linien und Banden (Fraunhofersche Linien), die namentlich im Ultraviolett sehr zahlreich sind und neben anderen Ursachen die schnelle Abnahme der Intensität des Sonnenlichtes im Ultraviolett bewirken. Die dunklen Linien lassen sich in zwei Klassen teilen, terrestrische Linien (oder Banden) und Linien außerterrestrischen Ursprungs. Erstere sind sehr dunkel, fast schwarz, letztere nur relativ dunkel, ihre Helligkeit kommt immer noch etwa derjenigen des Vollmondes gleich. Die terrestrischen Linien entstehen durch Absorption in der Erdatmosphäre, die übrigen Linien werden durch Umkehrung heller Linien in Gasspektren, in neuerer Zeit auch durch anomale Dispersion und Diffusion erklärt. Aus der Koinzidenz der Sonnenlinien mit Linien irdischer Lichtquellen wird auf die Anwesenheit zahlreicher Elemente in der umkehrenden Schicht der Sonne geschlossen. Neben den Absorptionsspektren der Elemente findet man auch Absorptionsspektra von Verbindungen. Die Absorptionslinien des Fraunhoferschen Spektrums zeigen je nach Zeit und Ort ihres Ursprungs auf der Sonne alle Variationen des Aussehens und der Veränderlichkeit, die oben im allgemeinen besprochen sind (vgl. den Artikel „Physik der Sonne"). Man kann jedoch von einem Durchschnittsspektrum der Sonne sprechen und dieses als Fraunhofersches Spektrum bezeichnen. Das so definierte Sonnenspektrum ist lange die Grundlage der spektroskopischen Messungen gewesen. Den Höhepunkt dieser Richtung bezeichnet der Rowlandsche Atlas des Sonnenspektrums mit seiner Ergänzung durch Higgs, die Aufnahme des ultraroten Sonnenspektrums durch Langley und die umfassende Ausmessung des Fraunhoferschen Spektrums durch Rowland und Jewell. In neuerer Zeit wird das Sonnenspektrum kaum mehr als Bezugsspektrum gewählt. Man untersucht mehr die Veränderungen des Sonnenspektrums. Die Arbeiten der Sonnenobservatorien enthalten seitdem zahlreiche Spezialtafeln und Messungen einzelner Linien oder ganzer Teile des Spektrums unter genau bestimmten Bedingungen.

16c) Erdmond, Planeten. Das Spektrum des Erdmondes ist dem Fraunhoferschen Spektrum gleich. Insbesondere treten keine neuen Absorptionslinien auf. Dagegen zeigen verschiedene Partien der Mondoberfläche verschiedenes Reflektionsvermögen für Ultrarot oder Ultraviolett (Wood, Miethe).

Merkur. Die Unterschiede seines Spektrums von demjenigen der Sonne sind gering und nicht sicher bekannt.

Venus. Das Spektrum stimmt mit dem Sonnenspektrum überein, abgesehen von Intensitätsunterschieden, die verschieden gedeutet werden. Im allgemeinen wird angenommen, daß Venus eine der Erde ähnliche Atmosphäre, nur reflektiertes, kein Eigenlicht besitzt.

Mars. Das Spektrum des Mars stimmt gleichfalls bis auf Intensitätsunterschiede mit dem Sonnenspektrum überein. Die terrestrischen Linien des Marsspektrums sind besonders viel untersucht worden. So glaubte man durch vergleichende Intensitätsmessungen der Wasserdampfbanden im Mondspektrum und in demjenigen des Mars Rückschlüsse auf die Anwesenheit von H_2O oder auf CO_2 in der Marsatmosphäre ziehen zu können (Lowell, Slipher). Auch Chlorophyllabsorption hat man im Marsspektrum gesucht. Doch sind diese Schlüsse bisher alle nicht stichhaltig (Campbell). Ein Beweis für Anwesenheit von H_2O, CO_2 usw. ist nicht erbracht, dagegen sind die Sauerstoffbanden möglicherweise verstärkt.

Kleine Planeten. Bei einzelnen derselben hat man Spuren von terrestrischen Linien (Verstärkung der terrestrischen Linien der Erde) wahrzunehmen geglaubt und daraus auf die Anwesenheit einer Atmosphäre geschlossen.

Jupiter. Im Spektrum des reflektierten Sonnenlichtes treten im Rot und Gelb eine Anzahl intensiver Absorptionsbanden unbekannten Ursprungs auf (speziell eine Bande bei 618). In dem Aequatorialstreifen zeigt sich zudem eine kontinuierliche Absorption im Blau. Ob die Banden von H_2O und O anwesend sind, ist zweifelhaft. Jupiter besitzt anscheinend kein Eigenlicht. Im Spektrum seiner Monde scheinen die für die Jupiteratmosphäre charakteristischen Banden zu fehlen.

Saturn. Das Spektrum gleicht demjenigen des Jupiter. Dieselben charakteristischen Absorptionsbänder sind zu sehen, freilich mit anderer relativer Intensität. Auch ist allgemeine Absorption im Blau und Violett vorhanden, besonders im Spektrum der dunklen Partien. Wie bei Jupiter wird hieraus auf die Anwesenheit einer Atmosphäre geschlossen. Ob dieselbe auch H_2O und O enthält, ist bisher nicht sicher entschieden.

Stellt man bei den Planeten den Spalt des Spektroskopes parallel zum Aequator, so erhält man nach dem Dopplerschen Prinzip die Spektrallinien als gerade Linien, die gegen die Längsrichtung des Spektrums geneigt sind. Der gleiche Versuch liefert beim Ring des Saturn gekrümmte Linien (Keeler, Hale), woraus die Zusammensetzung des Ringes aus Staub bezw. Meteoren folgt. Der Ring zeigt in seinem Spektrum keine Spuren von einer Atmosphäre.

Uranus. Neben den Linien des Fraunhoferschen Spektrums und den Absorptionsbanden des Jupiter finden sich weitere starke Absorptionsbanden unbekannten Ursprungs. Vielleicht finden sich darunter Absorptionsbanden von H_2O oder Absorptionslinien von H und He (Slipher).

Neptun. Zu den Absorptionsbanden des Uranusspektrums kommen weitere Banden unbekannten Ursprungs hinzu. Die Intensität der übrigen Banden ist verstärkt.

Zodiakallicht. Das Spektrum scheint kontinuierlich zu sein.

16d) Meteoriten, Kometen. Im Spektrum der Meteoriten kann man zwei verschiedene Erscheinungen unterscheiden, das Spektrum des Meteors selbst und das Spektrum der nachleuchtenden Luftsäule. Neben den Linien einer Reihe von Metallen, wie K, Na, Tl, Mg usw., hat man im Spektrum der Meteore Linien des Wasserstoffs und des Heliums beobachtet. Das

Spektrum soll demjenigen der Sterne fünfter Klasse entsprechen.

Die Spektra der Kometen sind in neuerer Zeit häufig beobachtet und von Komet zu Komet innerhalb gewisser Grenzen variabel gefunden worden. Der Kern des Kometen sendet in der Regel ein schwaches kontinuierliches Licht aus, in dem vielfach Fraunhofersche Linien gesehen worden sind. Mit der Entfernung vom Kopfe nimmt das kontinuierliche Spektrum schnell an Intensität ab, und es überwiegt ein Emissionsspektrum, in dem man einige Male neben Banden die D-Linien des Natriums gemessen hat (zweifelhaft, vielleicht Verwechslung mit CO). Die Banden sind zum Teil identifiziert und zwar mit den Banden des negativen Stickstoffspektrums, den Banden des Cyans, den Banden der Kohle und den Banden, die sich in Geißlerröhren zeigen, die mit CO von ganz geringem Drucke gefüllt sind (Fowler). Die relativen Intensitäten der verschiedenen Bestandteile der Kometenspektra können von Komet zu Komet sich ändern. In einigen Fällen ist ein Dopplereffekt von der zu erwartenden Größe gefunden worden. Absorption scheint die Kometenmaterie nicht in bemerkbarem Grade hervorzubringen.

16e) Sternklassen. Die Spektra der Fixsterne zeigen eine außerordentliche Mannigfaltigkeit, die sich schon bei oberflächlicher Beobachtung an der Verschiedenheit der Färbung zeigt, die gleichfalls zu einer Klassifikation der Sterne benutzt worden ist. Insbesondere haben sich auf der Differenz zwischen der visuell und photographisch gemessenen Sterngröße weittragende Schlüsse aufbauen lassen, die hier jedoch übergangen werden müssen. Weiter hat man durch die Bestimmung der Lage des Intensitätsmaximums in den Sternspektren ein Mittel zu einer Klassifizierung der Sterne. Man nimmt dann an, daß die Strahlung der Sterne zu vergleichen sei mit der Strahlung eines absolut schwarzen Körpers und bestimmt die effektive Temperatur des einzelnen Sterns. Die Werte, die man erhält — bis zu 40000° abs. —, gestatten, die Sterne in eine Temperaturskala einzuordnen. Es sei weiterhin nur von den rein spektroskopischen Untersuchungen die Rede, die sich auf die Analyse des Sternlichtes stützen. Auch hier liegt der benutzten Einteilung der Nebengedanke eines natürlichen Systems der Sternentwickelung im Sinne abnehmender Temperatur zugrunde, wenn auch die Klassifizierung selbst sich auf bestimmte spektroskopische Merkmale stützt. Für die Einteilung der Sternspektra kommen mehrere Klassifizierungen nebeneinander auch heute noch in Frage, wenn auch in der Regel das System des Draperkataloges (Pickering) benutzt wird. Auf Veranlassung der Solar-Union finden gegenwärtig Verhandlungen über eine Vereinheitlichung der Systematik der Sternspektra statt. Die einfachste und zugleich älteste Einteilung der Sterne ist diejenige von Secchi: Klasse I: Weiße oder blaue Sterne. Bei diesen Sternen sind die Metalllinien wenig zahlreich und schwach, dagegen die Wasserstofflinien intensiv. Beispiel: Sirius. Zu dieser Klasse gehören die meisten Sterne. Klasse II: Gelbe Sterne. Die Spektra enthalten zahlreiche dunkle Metalllinien. Beispiel: Sonne. Klasse III: Rote oder orangefarbige Sterne. Neben zahlreichen Metalllinien Metallbanden in Absorption, Kanten nach Violett. Die Spektra gleichen denjenigen der Sonnenflecken. Beispiel: β-Pegasi. Klasse IV: Dunkelrote Sterne. Zahlreiche dunkle Banden, die entgegengesetzt abschattiert sind wie diejenigen der vorigen Klasse und meist Kohlenstoffverbindungen angehören. Beispiel: 152 Schjellerup.

Hierzu hätte man als Klasse für sich noch die neuen Sterne hinzuzufügen, die helle und dunkle Linien zugleich enthalten und sich in kurzer Zeit völlig ändern.

Die Klassifizierung von H. C. Vogel teilt die Sternspektra in 3 Klassen mit je 3 bezw. 2 Unterklassen. Die Klasse I ist dieselbe wie die Klasse I von Secchi, d. h. Sterne mit wenigen dunklen Linien und weißer Farbe. Ihre Unterklassen sind: Ia = Sternspektra, die neben den Wasserstofflinien nur wenige schwache Metalllinien zeigen. Ib = Spektra, in denen die Wasserstofflinien ebenso scharf sind wie die Metalllinien. Beispiel: Rigel. Ic: Neben wenigen dunklen Linien sieht man die hellen Linien des Wasserstoffs und des Heliums (Heliumsterne). Beispiel: β-Lyrae. Klasse II: Gelbe Sterne mit zahlreichen dunklen Linien. Unterklasse IIa: Sonnensterne. IIb: Wolf-Rayet-Sterne, d. h. Sterne mit zahlreichen dunklen Linien, außerdem aber noch dunklen Banden und intensiven hellen Linien. Das Spektrum gleicht demjenigen der neuen Sterne. Klasse III: Rote Sterne mit dunklen Banden. Unterklasse IIIa: Sterne mit Banden, die nach Rot abschattiert sind, allgemeine Absorption im Blau. Beispiel: Beteigeuze. IIIb: Starke dunkle Banden nach Violett abschattiert. Später hat Vogel noch eine andere Einteilung der Klasse I angegeben und zwar Ia1: Nur starke Wasserstofflinien. Ia2: Nur Wasserstoff, Ca, Na, Mg, einige wenige andere Metalllinien, kein He; Ca-Linien schärfer als die H-Linien. Ia3: Viele Eisenlinien, kein He, Ca, ebenso stark oder stärker als H. Ib: Neben H dunkle He-Linien. Ic1: Neben den Linien von Ib noch helle Wasserstofflinien. Ic2: Neben den Linien von Ic1 noch helle He-Linien und Metalllinien.

Diese Klassifikation trägt jedoch der Mannigfaltigkeit der wirklich beobachteten Spektra nicht völlig Rechnung. So hat man Spektra beobachtet, in denen ein Teil der H-Linien hell, der andere dunkel ist. Auch findet man häufig die Superposition von zwei Spektren verschiedener Typen, besonders bei veränderlichen Sternen usw. Eine ähnliche Einteilung wie Vogel benutzt Lockyer, doch ist bei ihm die Reihenfolge eine andere. Am meisten benutzt wird die Einteilung von E. C. Pickering, wie sie in dem Draperkatalog auf Grund einer Durchmusterung der Sternspektra mittels Objektivprisma durchgeführt ist. Die Klassen werden mit Buchstaben bezeichnet: *A*: außer den H-Linien nur die Linie K des Calciums. *B*: außerdem noch He (Orionsterne), dazu die erste Nebenserie des H. *C*, *D*, *E*, *F* werden unterschieden nach dem Aussehen und der relativen Intensität der Wasserstoff- und Calciumlinien. Bei D sieht man außerdem helle Linien. C, D, E, F bilden die Klasse I von Secchi. *G*, *H* = Klasse II von Secchi. *G* = neben H (Ca) andere Metalllinien, *H* = kontinuierlicher Grund stärker im Rot, *I* = weitere Absorptionslinien, *K* = außerdem helle Linien, *L* = Varia-

tion von *K*. *M* = III Secchi, IIIa Vogel, *N* = IV Secchi = IIIb Vogel, *O* = IIb Vogel, *P* = Spektrum planetarischer Nebel.

Diese Einteilung ist in späteren Katalogen aus Harvard (Miß Maury, Miß Cannon) weiter spezialisiert worden. So teilt Miß Maury die Sterne in 22 durch Zahlen bezeichnete Klassen ein, von denen die ersten 5 die Heliumsterne, die folgenden 6 die Sterne der Klasse I von Secchi, die Klassen 12 bis 16 die Klasse II von Secchi, die Klassen 17 bis 20 den Typus III Secchi, 21 den Typus IV und 22 die Spektra planetarischer Nebel bezeichnen. Unterabteilungen werden durch die Zusätze a, b, c gebildet, wobei a bedeutet, daß alle Linien außer H und Ca scharf, b, daß sie diffus und c, daß die Ca-Linien stärker sind, als diejenigen des H. Zwischenstufen werden durch ab, ac usw. bezeichnet. Im ganzen werden 110 Unterabteilungen unterschieden. Miß Cannon endlich benutzt die Bezeichnungen des Draperkataloges, bildet aber dadurch Zwischenstufen, daß das Intervall zweier Klassen in 10 Teile geteilt wird, so daß B 5 A ein Spektrum bedeuten würde, das in der Mitte zwischen B und A liegt. Wie man sieht, sind vor allem die Linien des He, H, Ca, Ti, C benutzt worden, um die Spektra zu klassifizieren. Durch Berücksichtigung der Unterschiede im Aussehen der einzelnen Linien sowie des kontinuierlichen Grundes sind dann die Unterklassen gebildet worden. Es liegt nahe, aus diesem Grunde auch das jeweils vorherrschende Element zur Bezeichnung der Sterne zu benutzen (Huggins, Miß Clerk, de Gramont). So ist die Bezeichnung He-, H-, Sonnen-, Ti-, C-Sterne vorgeschlagen worden. Indes ist die Mannigfaltigkeit der vorhandenen Abstufungen zu groß und es hat sich gezeigt, daß in der Tat die Untereinteilung, so willkürlich sie in manchen Punkten auch ist, zu der Einteilung der Sterne paßt, die nach anderen Gesichtspunkten vorgenommen werden kann. Einzelheiten müssen hier übergangen werden.

16f) Spezielles über Sternspektra. Auch hier können nur einige allgemeine Bemerkungen gegeben werden. Zunächst findet man in den Sternspektren sehr viele Elemente, die auch auf der Erde bekannt sind, meist durch ihre Absorptionslinien wiedergegeben. Es herrschen vor H, He, Ca, Fe, Ti, V. Allein auch seltenere Elemente, z. B. Sc, finden sich vielfach, während manche Elemente, z. B. die Haloide, bisher nicht gefunden sind. Andererseits findet man auch Linien, die auf der Erde bisher nicht bekannten Elementen angehören oder man erhält Spektra von bekannten Elementen in Formen, die im Laboratorium nicht reproduzierbar sind. Dabei kann das Aussehen der Emissionsspektren und Absorptionsspektren jede Art der früher erwähnten Veränderungen aufweisen. Die stärkste Art der Veränderung besitzen die neuen Sterne. In ihrem Spektrum sieht man zunächst helle neben dunklen Absorptionslinien, dann findet man die Linien desselben Elementes, z. B. H, zugleich hell und dunkel, aber gegeneinander verschoben und durch eine eigentümliche Intensitätsverteilung charakterisiert. Im weiteren Verlaufe verblaßt das kontinuierliche Spektrum mit seinen Absorptionslinien und das Spektrum der Nova geht allmählich in ein typisches Nebelspektrum über. In neuester Zeit ist es geglückt (Kayser, Küstner) neben den stets vorhandenen Heliumlinien auch die Linien des Radiums und der Emanation als wahrscheinlich nachzuweisen.

Wenn schon die spektroskopischen Erscheinungen an der Sonne der Erklärung die größten Schwierigkeiten bieten (vgl. den Artikel „Physik der Sonne"), so trifft dies in noch höherem Maße bei den Sternspektren zu. Bisher hat sich noch eine Betrachtungsweise am fruchtbarsten erwiesen, bei der man die spektroskopischen Eigenschaften der Sterne in einen Zusammenhang bringt mit ihrer aus dem Verhalten des Spektrums, insbesondere auch der Intensitätsverteilung in den Serien und im kontinuierlichen Grunde, geschätzten Temperatur. Die Einteilung der Sternspektra ergibt dann zugleich eine freilich problematische Entwickelungs- oder Altersreihe der Fixsterne.

16g) Bewegung im Visionsradius. Schon Doppler hat bei Aufstellung seines Prinzips dessen Anwendung auf die Bestimmung der Sterne im Visionsradius im Auge gehabt, während erst Fizeau diese Anwendung klar und richtig aussprach. Eine Durchführung der praktischen Bestimmung der Bewegung im Visionsradius ist erst durch die Anwendung der Photographie und die Konstruktion brauchbarer Astrospektrographen gelungen (Vogel, Huggins). Seitdem ist eine ungeheuere Zahl von Sternen nach dieser Methode untersucht worden. Dies geschah durch den Vergleich der Wellenlänge der Linien des Sternspektrums mit demjenigen einer irdischen Lichtquelle oder eines Vergleichssternes. Aus der Verschiebung der einen Linien gegen die anderen ergibt sich unter Berücksichtigung der Bewegung der Erde nach dem Dopplerschen Prinzip der Geschwindigkeit im Visionsradius. Die Resultate dieser Messungen sind nun äußerst mannigfaltig. Man findet Sterne mit Geschwindigkeiten, die innerhalb des Beobachtungszeitraumes unveränderlich sind. Andere Geschwindigkeiten zeigen Variationen oder sie oszillieren gar in kurzen Intervallen zwischen positiven und negativen Grenzwerten. In diesem Falle erhält man also eine Geschwindigkeitskurve, deren Analyse nach den Prinzipien der Stellarmechanik zum Schlusse führt, daß der fragliche Stern sich in einer geschlossenen Bahn mit bestimmten Eigenschaften bewegt, also ein Stern mit einem oder auch zwei dunklen Begleitern ist. In vielen Fällen gehören derartige Sterne zugleich zu den photometrisch veränderlichen Sternen. Es pflegt dann die photometrische Periode mit der spektroskopischen übereinzustimmen. Ein anderer Typus von Sternspektren erweist sich als die Superposition zweier Spektra des gleichen oder auch verschiedener Typen mit variabler gegenseitiger Verschiebung. Auch in diesem Falle hat man, falls sich volle Perioden beobachten lassen, den Schluß auf die Existenz eines Doppelsternes oder eines Systems aus drei oder selbst mehr Komponenten ziehen können. Die Variation ist auch hier sehr groß. Bisher sind etwa 350 spektroskopische Doppelsterne bekannt. Da die Ausmessung der Spektra zugleich eine Bestimmung der Bahnelemente erlaubt, so ergeben sich eigentümliche Zusammenhänge zwischen der Größe derselben und dem Spektraltypus. Dies gilt insbesondere von der Periode, die z. B.

bei jungen Sternen (O, A Draper-Katalog, Typus δ-Cephei) sehr kurz ist, oft nur wenige Stunden beträgt. Man findet ferner alle Uebergänge zwischen Sternen, die sich berühren, und visuellen Doppelsternen usw.

Die Untersuchung der Geschwindigkeiten im Visionsradius liefert noch weitere Zusammenhänge. So lassen sich durch Benutzung der Parallaxe die absoluten Bewegungen im Raume ermitteln, ferner durch Berücksichtigung gleicher Geschwindigkeiten Sterngruppen, durch Bestimmung gleicher Durchschnittsgeschwindigkeiten nach dem gleichen Punkte hin Sternströme bilden (vgl. den Artikel „Sternsysteme“). Die Bestimmung der Verteilung der Radialgeschwindigkeiten in der Ekliptik führt zu einer Messung der Sonnenparallaxe, bezw. der Lichtgeschwindigkeit, die der Genauigkeit der terrestrischen Methoden kaum nachsteht (Küstner). Zu Einzelheiten fehlt auch hier der Raum.

16h) Nebelflecken. Die Spektroskopie der Nebelflecken stößt auf die größten Schwierigkeiten wegen der flächenhaften Ausdehnung und geringen Helligkeit der Objekte. Man hat gefunden, daß die Nebelflecken in der Regel ein aus hellen Linien bestehendes Emissionsspektrum besitzen, in dem neben den Linien des H, Linien eines unbekannten Körpers, darunter die Nebellinien 5007, 4959 und Linien des He auftreten. Diese Emission ist über verschiedene Teile desselben Nebels verschieden verteilt, so daß die monochromatischen Bilder eines Nebels (z. B. durch Absorptionsschirme) große Verschiedenheiten aufweisen. Die Geschwindigkeiten im Visionsradius sind, soweit bekannt, sehr klein.

16i) Raumabsorption. Das Auftreten unverschobener Absorptionslinien im Spektrum von bewegten Sternen, namentlich Doppelsternen, sowie Verschiedenheiten der an verschiedenen Wellenlängen desselben Spektrums gemessenen Phasen veränderlicher Sterne haben zu dem Schlusse geführt, daß einerseits an manchen Stellen des Raumes isolierte, absorbierende Gasmassen vorhanden sind, andererseits der Raum selbst eine Absorption ausübt, die man sich etwa als Zerstreuung an Staubmassen vorstellen müßte, die sich in den interstellaren Räumen finden.

16k) Zusammenhänge. Die Spektroskopie der Himmelskörper läßt sich nicht isoliert von anderen Zweigen der Astronomie und Astrophysik betreiben. Sterngeschwindigkeiten, Parallaxenverteilung, Häufigkeit der Fixsterne, ihre Verteilung, Helligkeit, Farbe zeigen sich eng verknüpft mit ihrem spektroskopischen Charakter, so daß ähnliche Betrachtungen wie auf den genannten Gebieten sich auch unmittelbar auf spektroskopischem Gebiete ausführen lassen.

Für die terrestrische Spektroskopie hat die kosmische Spektroskopie dadurch die größte Bedeutung, weil sie eine große Zahl von Variationen der Spektra zeigt, die sich bisher im Laboratorium nicht haben reproduzieren lassen und vielleicht auch nicht reproduziert werden können, da die kosmischen Bedingungen möglicherweise über die Grenzen der Laboratoriumsphysik (Temperatur, Dichte, Dicke usw.) hinausgehen. Es erfordert daher die Kenntnis eines Spektrums die Heranziehung seiner Eigenschaften in kosmischen Lichtquellen.

Literatur. *Die Literatur der Spektroskopie findet man mit großer Vollständigkeit angegeben und berücksichtigt in dem „Handbuch der Spektroskopie“ von* **H. Kayser**, *Band* 1 *bis* 6, *Leipzig 1900 bis 1912 (zweite Auflage der ersten Bände in Vorbereitung). Ferner bei* **H. Konen**, *Das Leuchten der Gase und Dämpfe, Braunschweig 1913 (speziell für die Gesetzmäßigkeiten). — Abbildungen der Spektra der meisten Elemente bringen die folgenden Werke:* **A. Hagenbach und H. Konen**, *Atlas der Emissionsspektren der meisten Elemente, nach photographischen Aufnahmen. Jena 1905. —* **J. M. Eder und E. Valenta**, *Atlas typischer Spektren. Wien 1911. —* **Dieselben**, *Beiträge zur Spektrochemie und Spektralanalyse. Wien 1904. —* **H. S. Uhler und R. W. Wood**, *Atlas of Absorption Spectra. Washington, Carnegie Institution 1907 (ausgewählte Substanzen, meist organische Farbstoffe). —* **H. A. Rowland**, *Photographic map of the Solar Spectrum. Johns Hopkins Press, Baltimore. — Proben der Spektra zahlreicher kosmischer Lichtquellen in den Bänden des Astrophysical Journal. — Wellenlängenkataloge am vollständigsten in Band* 5 *und* 6 *vom Handbuch der Spektroskopie von* **H. Kayser**, *ferner:* **F. Exner und E. Haschek**, *Die Spektren der Elemente, 2. Aufl. Wien 1911. —* **W. M. Watts**, *Index of Spectra, 2. Aufl. Manchester 1889 bis 1911. —* **F. Stanley**, *Lines in the arc spectra, London 1911, sowie in den oben genannten Atlanten. — Für das Sonnenspektrum:* **H. A. Rowland**, *Preliminary table of solar spectrum wavelengths. Chicago University Press 1896. — Die astrophysikalischen Bände des Kayserschen Handbuches sollen die Literatur und das Beobachtungsmaterial für die kosmischen Lichtquellen in gleicher Vollständigkeit bringen wie die ersten Bände für die irdischen. Hierzu noch* **Newcomb-Engelmann**, *Populäre Astronomie, 4. Aufl. Leipzig 1912. —* **P. Salet**, *Spectroscopie astronomique. Paris 1910.*

H. Konen.

Sperma.

Spermien oder Spermatozoen. Spermiogenese (Samenbildung).

1. Sperma und Spermien des Menschen. 2. Nematospermien der Wirbeltiere: Säugetiere. Vögel. Reptilien. Amphibien. Fische. 3. Nematospermien der Wirbellosen: Mollusken. Arthropoden. Würmer. Echinodermen. 4. Anematospermien der Wirbellosen: Niedere Krebse. Milben. Nematoden. Dekapoden. 5. Spermiogenese (Samenbildung). Entstehung der Spermatiden. Umwandlung der Spermatiden in Spermien.

Unter Sperma oder Samen versteht man das Absonderungsprodukt der reifen männlichen Keimdrüsen, der Hoden oder Testikel, dem meist die Sekrete von Anhangsdrüsen des Ausführungsganges der Keimdrüsen beigemengt sind.

1. Sperma und Spermien des Menschen. Beim Menschen ist das frisch entleerte Sperma eine Flüssigkeit von weißlichem,

durchscheinendem oder leicht milchigem Aussehen, von gelatinöser, klebriger Konsistenz und von neutraler bis schwach alkalischer Reaktion. In frischem Zustande besitzt es einen eigentümlichen, charakteristischen Spermageruch, welcher mit dem Geruch frisch gefeilter Knochen oder der Blüten von Berberis oder der echten Kastanie verglichen werden kann.

Der Geruch soll durch eine von Schreiner (1878) gefundene organische Base, das Spermin, hervorgerufen werden; ihr phosphorsaures Salz scheidet sich bei längerem Stehen des Spermas in Form von Prismen, Doppelpyramiden und Nadeln, den sogenannten Böttcherschen Spermakristallen, aus (Fig. 1 bei $_3$), welche schon von Leeuwenhoeck (1677) abgebildet, von Böttcher (1865) aber näher beschrieben worden sind.

Dem ejakulierten Sperma ist das milchig getrübte, dünnflüssige Sekret der Prostata, dem der charakteristische Spermageruch eigen ist, beigemischt, ferner das Sekret der Cowperschen oder Bulbiurethraldrüsen und der Samenblasen, sowie der Ampullen des Ductus deferens und der Urethraldrüsen. Es enthält 90% Wasser und 10% feste



Fig. 1. Menschliches Ejakulat bei etwa 300facher Vergrößerung. Halbschematisch. 1 Samenkörper oder Spermien mit von der Fläche gesehenem Kopf. 2 Desgl. mit von der Kante gesehenem Kopf. 3 Spermakristalle verschiedener Form. 4 Lymphocyten und gequollene Rundzellen aus den Samenwegen, 5 Zylinderzellen aus den Samenwegen. 6 Lezithinkörperchen, 7 Geschichtete Amyloidkörper aus der Prostata. Nach W. Waldeyer: Die Geschlechtszellen, im Handbuch der vergleichenden und experimentellen Entwickelungsgeschichte der Wirbeltiere von O. Hertwig. Jena 1906, Bd. I, Teil 1, erste Hälfte, S. 93, Fig. 5.

Bestandteile. Figur 1 gibt eine Anschauung von dem mikroskopischen Bilde, welches das menschliche Sperma nach Abkühlung und beginnender Eintrocknung darbietet.

Außer sehr vereinzelten Lymphocyten (Fig. 1 bei $_4$) und mehr oder weniger durch Quellung veränderten Rundzellen und Zylinderzellen aus den Samenwegen (Fig. 1 bei $_5$) sieht man in der mit feinen Eiweißkörnchen durchsetzten Flüssigkeit zahlreiche kleine kugelige Lecithinkörner (P. Fürbringer; Fig. 1 bei $_6$) und seltener geschichtete Amyloidkörper (Fig. 1 bei $_7$); die letzten beiden stammen aus der Prostata. Die Spermakristalle (Fig. 1 bei $_3$) entstehen erst bei beginnender Eintrocknung.

Der wesentlichste Bestandteil des Samens sind die Samenkörper oder Spermien (Fig. 1 bei $_1$ und $_2$), früher auch als Samenfäden, Samentiere, Spermatozoen, Spermatosomen oder Spermatozoiden bezeichnet. Diese 1677 von dem Studenten Ham in Leyden, einem Schüler von Leeuwenhoeck, entdeckten Elemente vermitteln allein die Befruchtung und sind in ungeheurer Zahl in der Samenflüssigkeit enthalten. Nach Lode enthält ein Ejakulat des Menschen, dessen durchschnittliche Menge noch nicht 3,5 ccm beträgt, 2 bis 300 Millionen Spermien.

Zunächst möge die nähere Beschreibung des menschlichen Spermiums folgen, welches gewissermaßen als Paradigma für den Bau der gleichen Gebilde der höheren Tiere, insbesondere der Säugetiere, aufgestellt werden kann.

Das Spermium des Menschen (Fig. 2 und 3) stellt eine Geißelzelle dar, welche im Hoden aus einer ursprünglichen Rundzelle entstanden und ihrer spezifischen Funktion angepaßt ist: sie hat die Aufgabe, das Reifei aufzusuchen, in dasselbe einzudringen und ihm die wesentlichsten Bestandteile der männlichen Keimzelle zuzuführen, vor allem das zur Bildung der Chromosomen erforderliche Chromatin, um die väterlichen Eigenschaften auf den durch die Befruchtung entstehenden neuen Organismus zu übertragen. Die Kernbestandteile, vor allem das Chromatin, welches nach Boveri und O. Hertwig als männlicher Vererbungsträger anzusehen ist, sind daher auf möglichst kleinen Raum zusammengedrängt, so daß unter Verlust der eigentlichen Kernstruktur die Kernbestandteile einen kleinen, leicht transportablen Körper, den sogenannten Kopf, bilden. Der Kopf besteht daher der Hauptsache nach aus kompaktem Chromatin. Dem hinteren Ende des Kopfes sitzt der Lokomotionsapparat in Form einer kontraktilen, lebhaft beweglichen Geißel, des sogenannten Schwanzes, an; zwischen Kopf und Schwanz befindet sich eine schmale, etwas eingeengte Stelle, welche als Hals unterschieden wird (Fig. 2 und 3, Hls).

Die Gesamtlänge des menschlichen Spermiums beträgt 50 bis 60 μ.

Der Kopf (Fig. 2 und 3) hat die Gestalt

eines besonders vorn abgeplatteten Ovals, dessen längerer Durchmesser in der Längsrichtung steht (Fig. 2). In Kantenansicht zeigt er daher Aehnlichkeit mit einer Birne oder einem Traubenkern mit nach vorn gerichteter abgerundeter Kante (Fig. 3). In der Mitte der beiden Kopfflächen läßt sich je eine schwache Vertiefung feststellen. Seine

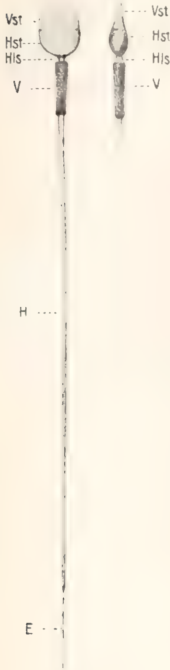


Fig. 2. Spermium des Menschen mit von der Fläche gesehenem Kopf. Vst Vorderstück des Kopfes (K), Hst Hinterstück des Kopfes (K), Hls Hals, V Verbindungsstück, H Hauptstück, E Endstück der Geißel. Nach G. Retzius, Biologische Untersuchungen, N. F., Bd. XIV, Tafel LX, Fig. 1. Um ½ verkleinert.

Fig. 3. Vorderer Teil des Spermiums des Menschen mit von der Kante gesehenem Kopf. Bezeichnungen wie bei Figur 3. Nach G. Retzius, Biologische Untersuchungen, N. F., Bd. XIV, Tafel LX, Fig. 8.

Länge beträgt 0,3 bis 5,2 μ, seine Breite 2,9 bis 3,6 μ. Uebrigens variiert die Kopfform etwas und kann auch, von der Fläche gesehen, mehr elliptisch werden.

In frischem Zustande sieht der Kopf homogen und stark lichtbrechend aus; besonders der dickere hintere Teil erscheint glänzend und setzt sich gegen den vorderen durch eine deutliche Grenze ab. Auch gegen Farbstoffe verhalten sich vorderer und hinterer Kopfteil verschieden, indem sich der letztere intensiver färbt. Man unterscheidet daher ein Vorderstück (Vst der Fig. 2 und 3) und ein Hinterstück (Hst der Fig. 2 und 3).

Im Kopf kommen bisweilen Einschlüsse in Gestalt von einem oder mehreren rundlichen, kleineren oder größeren Körpern vor; siehe den Spermienkopf der Fig. 6.

Der vordere Teil des Kopfes wird von einem zarten dünnen Ueberzug, der Kopfkappe (Fig. 4 bei Kp), bedeckt, welche an den menschlichen Samenkörpern gewöhnlich den vorderen zwei Dritteln oder auch drei Fünfteln des Kopfes dicht anliegt und hier schwer erkennbar ist; am hinteren Drittel des Kopfes hört die Kappe mit einer feinen Querlinie auf. In Figur 4 hat sie sich ein



Fig. 4. Vorderer Teil des Spermiums des Menschen mit von der Fläche gesehenem Kopf. Kp in Ablösung begriffene Kopfkappe. Nach G. Retzius, Biologische Untersuchungen, N. F., Bd. XIV, Tafel LX, Fig. 5. Um ½ verkleinert.

wenig abgelöst, wie es bisweilen vorkommt, und wird von der vorderen Grenze des Hinterstückes durch ein helles Querband getrennt.

An der Schwanzgeißel unterscheidet man:

1. das Halsstück (Hls der Fig. 2 und 3);
2. das Verbindungsstück (V);
3. das Hauptstück (H) und
4. das Endstück (E).

Von manchen Autoren wird das Halsstück noch als besonderer Bestandteil von der Geißel abgetrennt.

Das Halsstück (Hls) ist am menschlichen Spermium ein nur kurzer, heller, durchsichtiger Abschnitt, welcher ein wenig schmäler ist als das vordere Ende des Verbindungsstückes. Nach vorn hin verbreitert es sich ein wenig und trägt an seinem Ansatz am hinteren Kopfende die mehr oder weniger deutlichen proximalen Zentralkörperderivate (s. unten bei der Spermiogenese) in Form zweier nebeneinanderliegender, intensiv färbbarer, dunkler Körner (Fig. 2). Diese Körperchen inserieren genau in der Mittellinie am hinteren abgerundeten oder auch quer abgestutzten Kopfrande und vermitteln so den Zusammenhang zwischen Kopf und Geißel. Hier im Hals erfolgt auch häufig, besonders bei Mazeration, eine Ablösung der Geißel.

Die folgenden beiden Abschnitte (V und H) der Geißel werden in ihrer Achse von einem dünnen Achsenfaden durchzogen, der am Ende des Hauptstückes als das äußerst feine Endstück (E) frei zutage tritt. Bei dem menschlichen Spermium ist das Endstück relativ lang, länger als bei den Säugetieren, und vom Hauptstück deutlich abgesetzt; es ist gewöhnlich 1½mal so lang als das Verbindungsstück.

Eine feinere Struktur des Achsenfadens konnte bei den menschlichen Spermien noch nicht nachgewiesen werden.

Der dickste Teil der Geißel ist das Verbindungsstück (V der Fig. 2 und 3), welches zugleich die verwickeltste Struktur aufweist. Es ist, zusammen mit dem Halsstück, ungefähr so lang wie der Kopf. Meves hat auf Grund seiner entwickelungsgeschichtlichen Untersuchungen für die Struktur des Verbindungsstückes das beistehende Schema aufgestellt (Fig. 5). Danach wird



Fig. 5. Struktur des Halsstückes und Verbindungsstückes des menschlichen Spermiums. Nach dem von Meves aufgestellten Schema. Aus W. Waldeyer: Die Geschlechtszellen, in O. Hertwigs Handbuch der vergleichenden und experimentellen Entwickelungsgeschichte der Wirbeltiere 1906, I. Bd., erster Teil, erste Hälfte, Fig. 43 B, S. 146. Um $^1/_2$ verkleinert.

der zentral gelegene Achsenfaden zunächst von einer sehr dünnen Hülle umgeben, welcher ein in 8 bis 9 Windungen um den Achsenfaden herumgelegter Spiralfaden auflagert. Die Zwischenräume zwischen den Windungen werden von einer helleren Zwischensubstanz ausgefüllt, auf deren Vorhandensein von Ballowitz schon früher hingewiesen ist. Am vorderen und hinteren Ende ist die Spiralbildung abgeschlossen durch ein Derivat des hinteren Zentralkörpers oder Zentriols der Bildungszelle, das hinten einen vom Achsenfaden durchbohrten „Schlußring" (O. Jensen) bildet. Das Ganze ist von einer dünnen, feinpunktierten, außen ziemlich glatten Hülle umgeben, welche sich in dünnster Lage auch über das Halsstück bis an den Kopf erstreckt. An wohl nicht ganz ausgereiften Samenkörpern findet sich nicht selten eine tropfenartige Auftreibung dieser äußeren Masse, welche zuerst (1837) von Dujardin als „Schwanzanhang" beschrieben wurde (vgl. einige Spermien der Fig. 1).

Nach Meves soll der Achsenfaden das Halsstück nicht durchsetzen. Mit Recht macht dagegen Retzius darauf aufmerksam, daß an dem reifen menschlichen Spermium die erwähnten Strukturen nicht mehr sichtbar sind. Vor allem läßt sich eine Spiralfaser nicht mehr nachweisen. Auch ist Retzius (l. c. S. 212) „zu der Ueberzeugung gekommen, daß, wie Ballowitz dies bei den Spermien der Mammalier geschildert hat, in den menschlichen Spermien der Achsenfaden des Verbindungsstückes, in zwei etwas divergierende Fäden geteilt, durch das Halsstück zum hinteren Kopfende geht und hier die proximalen Zentralkörperkörner trägt, sowie am Kopfende sich befestigt". Am Hinterende des Verbindungsstückes erkennt man am reifen Spermium nur ausnahmsweise eine quere, dunkle Linie als Ausdruck des Schlußringes. Dagegen fand Retzius an unreifen, besonders mazerierten Spermien außer den vorderen beiden Zentralkörperderivaten auch am vorderen Ende des Verbindungsstückes zwei distale Körner und an dem hinteren Ende den Schlußring. Am Verbindungsstück liegen an den unreifen Spermien, anstatt einer Spiralfaser, 5 bis 7 meistens 6 Querreihen von glänzenden Körnern, auf welche von Brunn bei Säugetieren zuerst aufmerksam gemacht hat (s. unten bei der Spermiogenese), und aus welchen die Spiralfaser, dort wo sie vorhanden ist, entsteht.

Der längste Abschnitt der Geißel ist schließlich das Hauptstück, welches sich von dem beim Menschen deutlich abgesetzten Ende des Verbindungsstückes bis zum Endstück erstreckt und sich nach hinten hin ganz allmählich verdünnt. Es besteht nur aus dem Achsenfaden und einer dünnen, außen glatten Hülle, welche nach Meves mit der feineren, inneren Hülle des Verbindungsstückes noch direkt zusammenhängen soll.

Im frischen Sperma zeigen die Samenkörper eine sehr lebhafte Bewegung, welche darin besteht, daß die Geißel sich unter peitschenden Bewegungen in rascher Folge einbiegt und wieder streckt. Dabei geht der Kopf voran, behält seine Form und nimmt an der Bewegung keinen aktiven Anteil. Durch die schnellen Geißelschwingungen erfolgt trotz der Kleinheit des Körpers auch eine beträchtliche Vorwärtsbewegung: nach Henle und Lott sollen die menschlichen Spermien trotz ihrer Kleinheit bis 3,6 mm in der Minute zurücklegen können. „Ein Mensch von 160 cm Körperlänge müßte, um dieselbe Geschwindigkeit relativ zu seiner Körperlänge zu erreichen, 1 km in 9 Minuten zurücklegen, also im Geschwindschritt marschieren" (Waldeyer, l. c. S. 209). Auch muß die Bewegung der Spermien eine kraftvolle sein, da die Spermien im Uterus und der Tube den gegen die Scheide gerichteten Flimmerstrom zu überwinden haben.

Die Lebensfähigkeit der Samenkörper erhält sich am längsten in den weiblichen Geschlechtswegen; hier soll auch ihre Bewegung am lebhaftesten sein. Sie wurden hier von Hausmann noch nach einer Woche, von Dührßen sogar noch nach

über drei Wochen nach der letzten Begattung lebend gefunden. Auch gelang es Ahlfeld Spermien im Brutschrank bei Körpertemperatur über 8 Tage lang lebend zu erhalten. Es sei noch hervorgehoben, daß die Samenkörper in reinem Hodensekret keine Bewegungen zeigen und erst im Nebenhoden ihre völlige Reife erlangen.

Säuren, vor allem aber Wasserzusatz, heben die Bewegung auf; auf Wasserzusatz krümmen sich die Geißeln unter charakteristischer Oesenbildung zusammen. Solche Spermien können aber durch Zusatz konzentrierter Lösungen von Salzen, Zucker, Eiweiß u. a. wieder zur Bewegung gebracht werden. Zusatz schwacher Alkalien fördert die Bewegung.

Von großer forensischer Bedeutung ist, daß die Samenkörper sehr resistent sind und ihre Form lange bewahren; auch widerstehen sie längere Zeit der Fäulnis. Durch Auswaschen alter Samenflecke können daher die Spermien, insbesondere auch ihre charakteristischen Köpfe, noch lange Zeit mikroskopisch nachgewiesen werden. Selbst beim Ausglühen bewahren sie infolge ihres Kalkgehaltes noch ihre Form.

In neuerer Zeit ist man darauf aufmerksam geworden, daß in dem normalen Sperma gesunder Menschen und Tiere ganz regelmäßig abweichend gestaltete Spermien vorkommen, deren Bedeutung aber noch nicht aufgeklärt ist. Nachdem schon von früheren Forschern (von La Valette St. George, G. Retzius, v. Wiedersperg, Cutler, Bertachini, Maddox, Ballowitz, K. v. Bardeleben) Riesen- und Zwergformen, Doppelschwänze usw. beschrieben worden sind, haben neuerdings Bromann und G. Retzius diesen Formen besondere Aufmerksamkeit geschenkt.

Bromann unterschied 4 Hauptarten von atypischen Spermien und zwar erstens solche, welche bei normalen Größenverhältnissen durch eine abnorme Form, vor allem des Kopfes, abweichen, zweitens Riesen- und Zwergspermien, drittens einköpfige Spermien mit zwei und mehr Schwänzen und viertens zwei- oder mehrköpfige mit einem oder mehreren Schwänzen. In den Figuren 6 und 7 sind solche atypische Formen abgebildet. Am häufigsten kommen zweischwänzige Körper mit einem Kopf (Fig. 6), seltener mehrköpfige (Fig. 7) vor. Bromann leitet diese Formen, insbesondere die Doppelschwänze, von zwei- bis mehrpoligen Mitosen ab, während G. Retzius geneigt ist, die Doppelschwänze auf eine Spaltung des einfachen Schwanzes zurückzuführen.

2. Nematospermien der Wirbeltiere. Die Samenkörper der Tiere sind ganz außerordentlich verschieden. Man kann sagen, daß jede Tierart ihre besondere Spermienform von bestimmter Größe besitzt. Verwandte Tiergattungen zeigen gewöhnlich ähnliche Spermienformen; doch können auch nahe verwandte Tiergattungen nach Gestalt



Fig. 6 und 7. Zwei atypische Spermien aus dem normalen Sperma des Menschen.

Fig. 6. Spermium mit Doppelschwanz; die beiden Schwänze sind aber nur im vorderen Teil voneinander getrennt. Im Kopf befindet sich ein kleiner kugeliger Einschluß.

Fig. 7. Spermium mit zwei Köpfen und einfachem Schwanz. Nach G. Retzius, Biologische Untersuchungen, N. F., 1902, Bd. X, Tafel XXI, Fig. 5, 7 und 24. Um 1/2 verkleinert.

Fig. 6. Fig. 7.

und Größe sehr differente Spermien aufweisen, wie es z. B. bei den anuren Amphibien und den Turbellarien (s. unten) der Fall ist.

Bei weitem die meisten Tiere führen Samenkörper, welche mit einer Geißel, sehr selten mit mehreren, als Lokomotionsapparat ausgestattet sind; nur wenigen Tiergruppen fehlt diese. Man unterscheidet daher (Waldeyer):

I. Fadenspermien oder Nematospermien und

II. Kugelspermien oder Sphärospermien; doch ist ihre Form nur selten kugelförmig, so daß man sie wohl einfach als geißellose oder Anematospermien bezeichnen kann.

Die Samenflüssigkeit, in welcher die Samenkörper aufgeschwemmt sind, tritt, besonders bei niederen Tieren, oft zurück und kann bei Wasserbewohnern durch das umgebende Wasser, in welches das Sperma bei äußerer Befruchtung ergossen wird, ersetzt werden; bei manchen Wirbellosen fehlt die Samenflüssigkeit so gut wie ganz, so daß das Sperma nur aus den Samenkörpern besteht.

Wir wollen uns zunächst mit den Form- und Strukturverhältnissen der Fadenspermien, Nematospermien, beschäftigen, deren Kenntnis besonders durch die Untersuchungen von E. Ballowitz und neuerdings auch von G. Retzius gefördert worden ist.

Ballowitz führte seine ersten größeren Untersuchungen noch mit der Winkelschen homogenen Immersion 1:24 aus, welche damals für das beste System galt, während G. Retzius die neueren, inzwischen aufgekommenen Zeißschen Apochromate, insbesondere die Zeißsche homogene Oelimmersion Apochromat 2,0 mm, Apertur 1,30 mit dem Compensations-Ocular 12 benutzte, welche unzweifelhaft in der Definition mehr leistet als das Winkelsche System. Ballowitz hat dann in seinen neueren Arbeiten über Spermien auch die genannten Zeißschen Immersionen angewandt. Auch sind die Abbildungen von G. Retzius auf den vielen herrlichen Tafeln seiner großzügig durchgeführten „Biologischen Untersuchungen" (Neue Folge) in einem Format hergestellt, das zwar die Deutlichkeit und Uebersichtlichkeit sehr fördert, durch seine Größe aber die Publikation in Archiven und Zeitschriften, auf welche Ballowitz angewiesen war, völlig ausschließt. Sehr anzuerkennen ist, daß G. Retzius keine Kosten gescheut hat, um sich die seltensten und kostbarsten Tiere meist lediglich zu dem Zwecke zu verschaffen, um der Wissenschaft zu der Kenntnis ihrer Spermien zu verhelfen.

Am zweckmäßigsten berücksichtigen wir in systematischer Folge die einzelnen Klassen und Ordnungen der Tiere. Bevor ich hierauf näher eingehe, muß ich noch einige allgemeingültige Vorbemerkungen vorausschicken.

Am Vorderende des Kopfes befinden sich oft Einrichtungen, welche das Eindringen des Kopfes in das Ei ermöglichen und erleichtern sollen, besonders bei solchen Tieren, deren Eiern vorgebildete Eintrittskanäle (Mikropylen) fehlen. Solche Perforatorien, wie Waldeyer sie genannt hat, werden gegeben durch eine nadelförmig fein ausgezogene, bisweilen sogar mit Widerhaken versehene Spitze, durch schneidenartige Zuschärfung des Randes, durch einen korkzieherartigen Aufsatz u. dgl. m. Auch kann das ganze Spermium mehr oder weniger bohrerförmig werden. Bei Säugetieren ist die Kopfkappe bisweilen vergrößert und zu einem scharfrandigen, dünnen Perforatorium geworden; derartige große Kopfkappen lösen sich vom Kopfe leicht ab. Als Perforatorium kann auch schon der verschmälerte, vordere Kopfrand aufgefaßt werden, den wir oben an dem menschlichen Spermium kennen lernten. Der Kopf kann so schmal und dünn werden, daß er von der Geißel ohne weiteres nicht zu unterscheiden ist und nur durch Anwendung von Färbungen kenntlich gemacht werden kann.

An der Geißel ist der Bewegungsapparat bisweilen in einer besonderen Faser, der Bewegungsfaser, lokalisiert, die ein von vorn nach hinten verlaufendes, schönes Flimmerphänomen zeigt. Der übrige Teil der Faser hat alsdann die Kontraktilität verloren und ist zu einer Stützfaser geworden. Sind Flimmerfaser und Stützfaser miteinander durch eine dünne Membran verbunden, welche die Bewegungen der Flimmerfaser mitmacht, so spricht man von einer „undulierenden Membran". E. Ballowitz hat nachgewiesen, daß die kontraktilen Fasern der Spermien sich, gleich den stärkeren Flimmercilien, aus meist zahlreichen feinsten Fibrillen, den Elementarfibrillen, zusammensetzen, welche, parallel nebeneinander gelagert, die kontraktilen Teile der Geißel von Anfang bis zu Ende durchsetzen und nur durch sehr spärliche Kittsubstanz unter sich verbunden sind. Den Stützfasern, auch wenn dieselben den kontraktilen, fibrillären Fasern anderer Spermien homolog sind, fehlt dagegen mit der Kontraktilität auch die fibrilläre Struktur. Dadurch wird die von manchen Autoren geäußerte Ansicht hinfällig, daß die Elementarfibrillen der Bewegungsfasern nicht mit der Kontraktilität zusammenhängen, sondern Stützfibrillen der Fasern darstellen; denn wenn es sich hier um Stützfibrillen handelte, müßten diese doch vor allem in den eigentlichen Stützfasern ausgebildet sein. Hier fehlen sie aber vollkommen (vgl. unten bei den Spermien der urodelen Amphibien und der Insekten). Die Geißeln mancher Spermien stellen demnach kompliziert strukturierte, oft aus vielen verschiedenartigen Fasern und Fibrillen aufgebaute, förmliche Bewegungsmaschinen dar. Aus den Strukturverhältnissen dieser Gebilde läßt sich nach Ballowitz mit Wahrscheinlichkeit der Satz folgern, daß alle regelmäßige, in bestimmten Bahnen verlaufende Kontraktion kontraktiler Substanzen an das Vorhandensein regelmäßiger, parallel oder annähernd parallel nebeneinanderliegender, kontraktiler Fibrillen gebunden ist; die Fibrillen, nicht die Zwischensubstanz, sind für die Kontraktilität das Wesentliche, die Fibrillen müssen als die eigentlichen Träger der Kontraktilität angesehen werden.

Ob und inwieweit etwa die Zentralkörperderivate die Bewegung der Fibrillen als deren kinetische Zentra beherrschen und regulieren, muß dahingestellt bleiben.

Säugetiere. Die Spermien der Säugetiere (Mammalia) sind in den Grundzügen den oben näher beschriebenen menschlichen Spermien ähnlich gebaut. Wie bei letzteren ist der oft stark abgeplattete Kopf mit wenigen Ausnahmen von breitovaler bis elliptischer Begrenzung; auch die Geißel zeigt meist die gleichen Abschnitte. Nur bei Manis (Fig. 8) und Echidna ist der Kopf schmal nadelförmig, wie bei den meisten Sauropsiden (s. unten); bei Echidna läuft er nach G. Retzius vorn in ein fein zugeschärftes, als Perforatorium fungierendes Spitzenstück aus. Der Achsenfaden der in ihrer Gesamtheit kontraktilen Geißel besitzt eine bei vielen Säugetieren nachweisbare Zusammensetzung aus zahlreichen feinsten Elementenfibrillen, welche sich in zwei voneinander trennbare Hauptbündel zusammenlagern (Fig. 9 von der Ratte). Zwischen den beiden Hauptbündeln spaltet sich bei Mazeration bisweilen noch eine feinere Faser

ab, bevor der fibrilläre Zerfall der Hauptbündel eintritt (Fig. 12).

Bei vielen Säugern, z. B. dem Hengst, Schwein und Schafbock, durchsetzen die beiden etwas divergierenden Bündel den Hals und heften sich am Kopf mit je einem Endköpfchen, den beiden proximalen Zentralkörpern oder Zentriolen, an (Fig. 11, 12 und 13). Neuerdings sind bei Arthiodactylen auch drei proximale Körnchen nebst drei Halsfäden beschrieben worden.

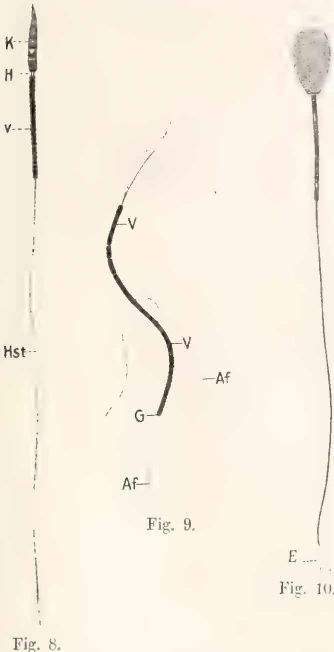


Fig. 8. Spermium des Schuppentieres (Manis longicandata Shaw.). K. Kopf, H Halsstück, V Verbindungsstück, Hst Hauptstück der Geißel. Nach E. Ballowitz, Form und Struktur der Schuppentierspermien, Zeitschr. f. wissensch. Zool., Bd. LXXXVI, Heft 4, 1907, Tafel XXX, Fig. 1. Um $^1/_3$ verkleinert.

Fig. 9. Eine isolierte Geißel eines Rattenspermiums, deren Achsenfaden (Af) in Fibrillen zerlegt ist. V Verbindungsstück, dessen mit Spiralfaden versehene Hülle zum Teil abgefallen ist. Nach E. Ballowitz, Weitere Beobachtungen über den feineren Bau der Säugetierspermatozoen, Zeitschr. f. wissensch. Zool., Bd. LII, 1891, Tafel XV, Fig. 87.

Fig. 10. Spermium vom Stier. Das Endstück (E) ist in Fädchen zerfallen. Nach E. Ballowitz, Das Retziussche Endstück der Säugetierspermatozoen. Internat. Monatsschr. f. Anat. u. Physiol. 1890, Bd. VII, Heft 6, Tafel XI, Fig. 5.

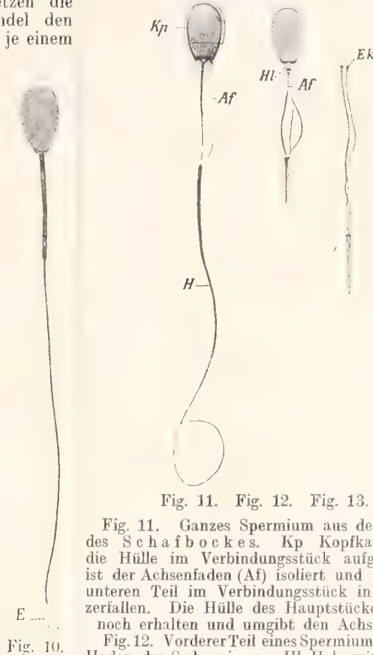


Fig. 11. Ganzes Spermium aus dem Hoden des Schafbockes. Kp Kopfkappe. Da die Hülle im Verbindungsstück aufgelöst ist, ist der Achsenfaden (Af) isoliert und in seinem unteren Teil im Verbindungsstück in 2 Fäden zerfallen. Die Hülle des Hauptstückes (H) ist noch erhalten und umgibt den Achsenfaden.

Fig. 12. Vorderer Teil eines Spermiums aus dem Hoden des Schweines. Hl Hals mit 2 divergierenden Fäden. Im Verbindungsstück, dessen Hülle aufgelöst ist, ist der Achsenfaden (Af) in 2 Fäden zerfallen, zwischen denen sich noch ein feinerer Faden isoliert hat.

Fig. 13. Vorderer Teil der Geißel eines Spermiums vom Maulwurf. Der im Verbindungsstück isolierte Achsenfaden hat sich in 2 Fäden zerlegt, deren jeder vorn ein Endknöpfchen (Ek) trägt.

Fig. 11 bis 13 nach E. Ballowitz, Weitere Beobachtungen über den feineren Bau der Säugetierspermatozoen. Zeitschr. f. wissensch. Zoologie, Bd. LII, 1891, Tafel XV, Fig. 91, Tafel XIV, Fig. 84 und 50.

Auch das sehr feine Endstück enthält noch die Fibrillen und läßt schon bei Färbung der frischen Spermien (Hund, Kater, Stier, Ratte, Igel) nicht selten die isolierten Fäserchen erkennen (Fig. 10 bei E).

G. Retzius ist es kürzlich gelungen, in den wertvollen Besitz reifer Hoden anthropomorpher Affen (Gibbon, Schimpanse, Orang-Utan) zu gelangen und in

ihnen die Spermien aufzufinden, was im Hinblick auf den nahe verwandten Menschen ein besonderes Interesse bietet. Die Figuren 14 und 15 stellen nach dem genannten Forscher die Spermien vom Schimpansen dar, und zwar Figur 14 bei Flächenansicht des Kopfes und Figur 15 bei dessen Kantenansicht. Die Samenkörper des Schimpansen stehen denen des Menschen näher und ähneln den letzteren mehr als den auch größeren Spermien des Orangs; die spiralige Struktur der Hülle des Verbindungsstückes ist im Gegensatz zu Mensch und Orang sehr deutlich und wird nach G. Retzius durch Zusammenlagerung von v. Brunnschen Körnern gebildet.

Die Form des Kopfes ist bei den meisten Huftieren, Insektivoren, Raubtieren, manchen Nagern, Dasypus, niederen Affen und Halbaffen mehr oder weniger abgeplattet, oval bis elliptisch, bei manchen Arten auch breit kreisförmig und bietet nichts Besonderes. Bisweilen tritt im Innern des Kopfes nach Färbung ein vorn abgerundeter Innenkörper hervor. Die Figur 16 zeigt diesen Innenkörper bei dem Stier nebst der zum Teil in Abhebung begriffenen Kopfkappe.

Abweichend verhalten sich die Samenkörper mancher Chiropteren, Nager und besonders der Beuteltiere.

Bei Vesperugo (Fig. 17 u. 18) ist das Verbindungsstück (V) im Verhältnis zu der Kleinheit des ganzen Körpers sehr groß und breit, dabei etwas abgeplattet; in ihm tritt außerordentlich deutlich der in zahlreichen Windungen um den dünnen Achsenfaden gelegte Spiralfaden hervor, dessen Lücken durch eine Zwischensubstanz ausgefüllt sind. Auch in dem vorderen dicken Teil des Hauptstückes läßt sich ein Spiralfaden nachweisen, welcher aber in denjenigen des Verbindungsstückes nicht übergeht.

Vielleicht steht dieser Bau in Zusammenhang mit der Fortpflanzungsart dieser Tiere, die sich im Herbst begatten, während die Ovulation und Befruchtung des Eies erst im Frühling stattfindet. Das Sperma wird zu diesem Zwecke in dem Uterus aufgehäuft und muß darin monatelang befruchtungsfähig bleiben. Der Uterus ist daher im Winter bis zu Erbsengröße mit Sperma prall angefüllt und dient förmlich als Receptaculum seminis. Bei Chiropteren mit anderer Fortpflanzungsart fehlt diese dicke, den kontraktilen Achsenfaden schützend umgebende Hülle, wie die Fig. 19 von Rhinolophus, Fig. 20 und 21 von einem frugivoren Chiropter (fliegender Hund, Pteropus edwardsi Geoffr.) zeigen, deren Spermienköpfe sich durch den Besitz einer großen Kopfkappe auszeichnen.

Fig. 14. Fig. 15.

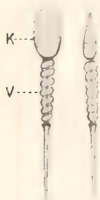


Fig. 14. Spermium des Schimpansen bei Flachenansicht des Kopfes. K Kopf mit Kopfkappe, V Verbindungsstück, H Hauptstück, E Endstück der Geißel. Nach G. Retzius, Biolog. Unters., N. F., Bd. XVI, 1911, Tafel XXIV, Fig. 1. Um ½ verkleinert.

Fig. 15. Vorderer Teil des Spermiums des Schimpansen bei Kantenansicht des Kopfes. Nach G. Retzius, ibidem, Fig. 2. Um ½ verkleinert.

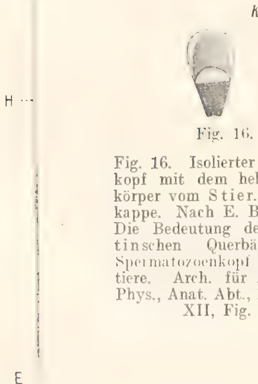


Fig. 16.

Fig. 16. Isolierter Spermienkopf mit dem hellen Innenkörper vom Stier. K Kopfkappe. Nach E. Ballowitz, Die Bedeutung der Valentinschen Querbänder am Spermatozoenkopf der Säugetiere. Arch. für Anat. und Phys., Anat. Abt., 1891, Tafel XII, Fig. 6.

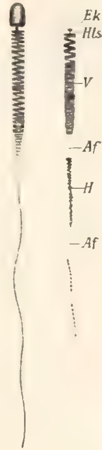


Fig. 17. Fig. 18.

Fig. 17. Spermium von Vesperugo noctula K. u. Blas., aus dem Nebenhoden. K Kopf von der Fläche gesehen, V Verbindungsstück mit dem sehr deutlichen Spiralfaden, H Hauptstück, in dessen vorderem Teil gleichfalls ein Spiralfaden deutlich ist. Nach E. Ballowitz, Weitere Beobachtungen über den feineren Bau der Säugetierspermatozoen. Zeitschr. f. wissensch. Zool., Bd. LII, Heft 2, 1891, Tafel XIII, Fig. 1.

Fig. 18. Geißel ohne Kopf von Vesperugo noctula K. u. Blas., aus dem Inhalt des Uterus im Januar untersucht. Ek Endknöpfchen (proximale Zentralkörper), Hls Halsstücke des Achsenfadens. Im Hauptstück (H) hat sich die Spiralhülle zum Teil vom Achsenfaden (Af) abgelöst. Nach E. Ballowitz, ibidem, Fig. 22.



Fig. 19. Vorderer Teil des Spermiums von Rhinolophus Ferrum equinum K. u. Blas. Kp Kopfkappe. Nach E. Ballowitz, Weitere Beobachtungen über den feineren Bau der Säugetierspermatozoen, Zeitschr. f. wissensch. Zool., Bd. LII, 1891, Tafel XIII, Fig. 32.

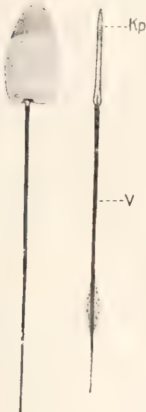


Fig. 20. Fig. 21.

Fig. 20 und 21. Vorderer Teil zweier Spermien von Pteropus Edwardsii Geoffr. St. H.: Fig. 28 bei Flächenansicht des Kopfes; Fig. 21 bei dessen Kantenansicht. Kp Kopfkappe, V Verbindungsstück. Nach E. Ballowitz, Zur Kenntnis der Spermien der frugivoren Chiropteren und der Prosimier mit Einschluß von Chiromys madagascariensis Desm. Anat. Anz. XXXIV. Bd., 1909, S. 277, Fig. 3 u. 4. Um $^1/_3$ verkleinert.

Besonders groß ist auch die Kopfkappe bei dem Meerschweinchen, bei Cynomys und Talpa.

Die Familie der Muriden (auch Lemmus nach G. Retzius) wird durch die Beilform des Spermienkopfes charakterisiert. Bei Mus musculus (Fig. 23) ist der Kopf



Fig. 22. Isolierter Kopf eines Spermiums von Microcebus myoxinus Pts., mit am hinteren Rande sitzendem Zentralkörperchen. Nach E. Ballowitz, Zur Kenntnis der Spermien der frugivoren Chiropteren und der Prosimier mit Einschluß von Chiromys madagascariensis. Anat. Anzeiger, Bd. XXXIV, 1909, S. 282, Fig 15. Um $^1/_3$ verkleinert.

breit und abgeplattet. Der eine Rand ist konvex, der entgegengesetzte gerade und nur nach vorn konkav. Beide Ränder laufen nach vorn in eine rückwärts gebogene, feine Spitze aus. Der vordere größere Teil des Kopfes wird von einer gleichgestalteten Kopfkappe bedeckt, in welchem sich ein intensiv färbbares, zuerst von O. Jensen bei der Ratte aufgefundenes, feines Stäbchen befindet, das als Perforatorium aufzufassen ist. Der Kopf des Rattenspermiums ist wesentlich schmäler, ebenso bei Mus norvegicus. Beide Tiere haben besonders große Spermien. Das Verbindungsstück der Geißel ist bei den Muriden lang und enthält einen in vielen feinen Spiralwindungen um den Achsenfaden herumgelegten Spiralfaden (Fig. 23 V; vgl. auch die Fig. 9). Hervorzuheben ist noch die exzentrische Insertion der Geißel an dem hinteren Ende der geraden Kopfkante. Auch bei anderen Tieren kann eine, wenn auch nicht so weitgehende, exzentrische Insertion der Geißel am Kopf verzeichnet werden, wie z. B. bei dem Meerschweinchen, dem Igel u. a.

Der Beilform nähert sich der auch mit großer Kopfkappe versehene Spermienkopf eines Halbaffen, Microcebus myoxinus Pts. (Fig. 22). Bemerkenswert ist bei Microcebus auch, daß sich der eine proximale Zentralkörper von dem einen Teilfaden des Achsenfadens im Halsstück ganz abgelöst hat und infolgedessen an dem Kopf, und nicht, wie sonst, an der Geißel sitzen bleibt, wenn sich die letztere vom Kopf ablöst (Fig. 22).



Fig. 23. Vorderer Teil des Spermiums von Mus musculus. Nach G. Retzius, Biolog. Unters., N. F., Bd. XIV, 1909, Tafel XLVI, Fig. 2. Um $^2/_3$ verkleinert.

Den absonderlichsten Bau zeigen unter den Mammalien die Samenkörper der Beuteltiere, von welchen G. Retzius kürzlich mehrere Arten untersucht hat. Die Figuren 24 bis 26 sind Kopien der Retziusschen Abbildungen von Bettongia cuniculus Ogilby und zwar Figur 24 und 25 in verkleinertem Maßstabe. In Figur 24 blickt man auf die Kante des Kopfes, welcher in eigentümlicher Weise mit seinem Längsdurchmesser quer zur Geißel gestellt ist. Retzius hält es indessen für wahrscheinlich, daß der Kopf bei der Bewegung des Samenkörpers seine Richtung so ändert, daß die Spitze des Kopfes mit dem Spitzenstück vorangeht, wie dies bei dem Känguruh (Macropus und Petrogale) in der Tat der Fall ist, eine Stellung des Kopfes, welche Figur 25 vorführt. Man sieht in diesen beiden Figuren, daß der Kopf abgeplattet

und von länglichovaler Gestalt ist. Dem vorderen Ende sitzt ein ringförmiges, dickes, dunkles Spitzenstück oben auf. Die Unterfläche des hinteren Kopfteiles besitzt eine Rinne, die besonders deutlich im optischen Querschnitt des in der Längsrichtung gesehenen Kopfes (Fig. 26) hervor-

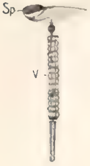


Fig. 24.



Fig. 25.



Fig. 26.

Fig. 24. Vorderer Teil des Spermiums von Betongia cuniculus Ogilby. Der in Kantenansicht gesehene Kopf (K) ist unter rechtem Winkel zur Geißel gestellt. Sp scheibenförmiges Spitzenstück des Kopfes, V Verbindungsstück, H Hauptstück der Geißel. Nach G. Retzius, Biolog. Unters., N. F., Bd. XIII, 1906, Tafel XXX, Fig. 1. Um $^2/_3$ verkleinert.

Fig. 25. Vorderer Teil des Spermiums von Betongia cuniculus Ogilby. Der von der Oberseite gesehene Kopf ist an der Geißel in der Richtung der Längsachse der Geißel, mit dem Spitzenstück (Sp) voran, angeordnet. Nach G. Retzius, ibidem, Fig. 9. Um $^2/_3$ verkleinert.

Fig. 26. Kopf, Halsstück und vorderer Teil des isolierten Achsenfadens eines Spermiums von Betongia cuniculus Ogilby. Der in der Richtung seiner Längsachse gesehene Kopf ist im optischen Querschnitt gezeichnet. Nach G. Retzius, ibidem, Fig. 12. Nicht verkleinert.

tritt. Am vorderen Ende dieser Rinne dicht vor der Mitte des Kopfes inseriert das Halsstück des dünnen Achsenfadens mit einem kleinen proximalen Zentralkörper, auf welchen nach hinten hin noch ein größeres Korn folgt.

Das Verbindungsstück fällt dadurch auf, daß in seiner Hülle die in großer Zahl vorhandenen v. Brunnschen Körner noch isoliert geblieben sind und sich nicht zu einer Spiralbildung zusammengeschlossen haben. Dagegen gelang es G. Retzius in der Hülle des Hauptstückes bis hinten hin einen deutlichen Spiralfaden nachzuweisen.

Im Jahre 1886 entdeckte Selenka bei seinen Studien über die Entwickelung des Opossums, daß die Spermien dieses Tieres mit den Köpfen zu je zwei verbunden sind (Fig. 27) und sich so paarweise vereint lebhaft vorwärts bewegen. Diese Kopulation tritt erst im Nebenhoden ein und findet sich noch nicht im Hoden. Infolge der Vereinigung ist der Kopf hinsichtlich seiner beiden Seitenhälften unsymmetrisch geworden und auch sonst von dem der übrigen bisher untersuchten Beuteltiere abweichend gebaut. Wie die Figuren 27 und 28 zeigen, besteht er

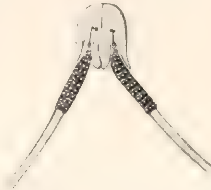


Fig. 27. Vorderes Ende zweier mit den Köpfen kopulierter Spermien aus dem Nebenhoden von Didelphys Opossum. Nach G. Retzius, Biologische Untersuchungen, N. F., Bd. XIV, 1909, Tafel XXXVIII, Fig. 1. Um $^2/_3$ verkleinert.

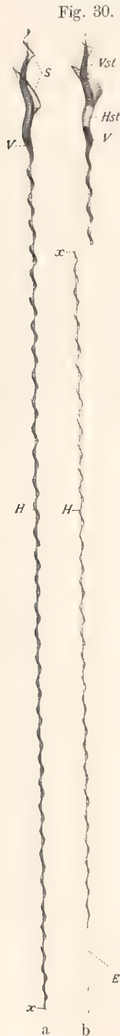


Fig. 28. Kopf und vorderer Teil des Verbindungsstückes eines isolierten Spermiums von Didelphys Opossum. Nach G. Retzius, ibidem, Fig. 2. Um $^2/_3$ verkleinert.

nach G. Retzius aus einer vorderen breiteren Scheibe und zwei von dieser nach hinten hin gehenden schmäleren Fortsätzen. Der vorderen Scheibe fehlt jede Andeutung des Spitzenstückes, welches bei den übrigen Beutlern so auffällig wird. Die beiden Fortsätze besitzen eine verschiedene Gestalt; der eine ist dicker und etwas kürzer, der andere schmäler und nach hinten zugespitzt. Bei der einen Hälfte der Spermienköpfe ist der rechte Ausläufer der dickere, bei der anderen Hälfte umgekehrt der linke. Die Köpfe vereinigen sich nun stets derart, daß sich die dickeren Fortsätze mit ihren Rändern zusammenlegen und aneinander befestigen Eine ähnliche Syzygie der Spermien ist auch unter den Wirbellosen bei den Dytisciden von E. Ballowitz und Auerbach und neuerdings von G. Retzius bei einem Mollusk (Turritella; s. unten) beschrieben worden.

Uebrigens wird auch eine festere Zusammenlagerung der Köpfe zu zweien und mehreren an sich in solcher Vereinigung lebhaft vorwärts bewegenden Spermien bei anderen Mammalien beobachtet, deren Köpfe sich durch eine große Breite und Dünnheit auszeichnen (Meerschweinchen, Dasypus). Da hier aber besondere, der Kopulation dienende Vorrichtungen fehlen, wird der Zusammenhalt an diesen wohl nur durch die Adhäsion und Klebrigkeit der Köpfe bewirkt.

Vögel. Die Spermien der Vögel bieten dadurch ein großes Interesse, daß sie in zwei differenten Formen auftreten, welche auch Anhaltspunkte zur Beurteilung der systematischen Zusammengehörigkeit und Verwandtschaft ihrer Träger liefern. Die eine Form ist einfacher gebaut und repräsentiert den Sauropsidentypus, wie er in allgemeinerer Verbreitung bei den Reptilien (s. unten) angetroffen wird. Der andere, davon sehr differente Typus ist hochspezialisiert und auf die Gruppe der Passeres beschränkt.



Die Samenkörper der Passeres sind nach dem Prinzip des Bohrers geformt und können als ein Wunderwerk mikroskopischer Feintechnik bezeichnet werden. Besonders ihr Kopf gleicht ganz dem Modell eines Tiefbohrers, wie die Figuren 29 bis 32 zeigen. Er besteht aus einem Vorder- (Vst) und einem Hinterstück (Hst), welches letztere allein das chromatinhaltige Kernderivat darstellt. Das Vorderstück ist in mehreren Spiralwindungen gedreht, welche sich nach außen in einen scharfrandigen, feinen Saum (S) verjüngen. Die vordersten Windungen sind weit schmaler als die hinteren und laufen in eine äußerst feine Spitze aus; sie dienen als Vorbohrer, so daß wir in dem Vorderstücke ein Perforatorium vor uns haben, welches als solches äußerst wirksam fungieren muß.

Fig. 29. Spermium des Buchfinken (Fringilla caelebs L.), welches sich durch seine Größe auszeichnet. Bei xx (a und b) mußte die Geißel durchtrennt gezeichnet werden, um sie plazieren zu können.
S schraubenförmiger Saum des Vorderstückes des Kopfes. V Verbindungsstück, H Hauptstück, E Endstück der Geißel. Nach E. Ballowitz, Untersuchungen über die Struktur der Spermatozoen, zugleich ein Beitrag zur Lehre vom feineren Bau der kontraktilen Elemente. Teil I, Die Spermatozoen der Vögel. Arch. f. mikrosk. Anatomie, Bd. 32, Tafel XIV, Fig. 1.

Fig. 30. Vorderer Teil des Spermiums des Buchfinken. Vst Vorderstück, Hst Hinterstück des Kopfes. Nach E. Ballowitz, ibidem, Fig. 3.

Die Geißel besteht aus einem Spiralfaden und einem Achsenfaden, welcher letztere am hinteren Ende des ersteren als dünnes, kurzes Endstück (E) frei hervortritt. Der Spiralfaden legt sich in zahlreichen Spiralen um den Achsenfaden und setzt die Windungen des Kopfbohrers nach hinten hin fort. Die vorderste Windung ist als eine Art Verbindungsstück (V) etwas verdickt.

Die Bewegungen äußern sich in lebhaften Schwingungen der Gesamtgeißel, ähnlich den Schwingungen einer Saite, so daß der Körper sich unter schneller Rotation geradlinig vorwärts bewegt. Der Achsenfaden setzt sich seiner ganzen Länge nach aus zahlreichen feinsten Elementarfibrillen zusammen und wird an seinem vorderen Ende durch ein bis zwei Endknöpfe, die Zentralkörperderivate, abgeschlossen. Ballowitz hat darauf hingewiesen, daß bei Corviden (Oriolus, Corvus) und den Lanius-Arten der Spiralfaden sich zwar anlegt, an dem ausgebildeten Spermium aber nicht mehr nachweisbar ist (Fig. 31 und 32); vielmehr löst er sich ab und wird daher im Sperma im isolierten Zustande zahlreich angetroffen. G. Retzius hat kürzlich beschrieben, daß dieser Spiralfaden sich bei den Corviden an den unreifen Spermien im Hoden vor seiner Ablösung sogar noch auf den Kopf erstreckt. Daß diese gleiche Eigentümlichkeit sich auch bei den Würgerarten (Lanius) vorfindet, deutet unzweifelhaft auf ihre Verwandtschaft mit den Corviden hin.

Der andere Spermientypus der übrigen Vögel ist wesentlich einfacher und ähnelt



Fig. 31. Spermium vom Pirol (Oriolus galbula L.).

Fig. 32. Spermium vom Würger (Lanius collurio L.). S schraubenförmiger Saum des Vorderstückes des Kopfes, V Verbindungsstück, H Hauptstück der Geißel; an letzterem fehlt der Spiralfaden. Nach E. Ballowitz, ibidem, Tafel XVII, Fig. 63 und Fig. 76.

dem der meisten Reptilien. Der schmale, verschieden lange, bisweilen leicht spiralig gedrehte Kopf besitzt vorn ein nicht langes Spitzenstück. An der Geißel läßt sich ein meist nur kurzes Verbindungsstück mit wenigen Spiralwindungen, ein Hauptstück und hier und da auch ein Endstück verzeichnen. Bei dem Kampfhahn (Pavoncella pugnax L.) fand Retzius das Verbindungsstück besonders lang. Auffallend lang wird das letztere bei der Taube und besitzt zahlreiche enge Windungen eines Spiralfadens. Ballowitz hatte diesen Abschnitt bei der Taube nach seinen Befunden an den Schlangenspermien als Verbindungsstück gedeutet, während Benda auf Grund seiner spermiogenetischen Untersuchungen die Behauptung aufgestellt hat, daß dieser Teil der eigentliche Kopf des Spermiums sei, und das von Ballowitz für den Kopf erklärte Stück dem Spitzenstück des Kopfes entspreche. G. Retzius bestätigte in seinen jüngsten Arbeiten die Auffassung von Ballowitz und wies nach, daß die Deutung von Benda keinesfalls zutrifft.

Reptilien. Den zuletzt geschilderten Spermien der Vögel gleichen die Spermien der Reptilien, so daß diese Spermiumform mit Recht als Sauropsidentypus bezeichnet werden kann und keiner weiteren Illustrierung bedarf. Bei den Schlangen ist das Verbindungsstück, ähnlich dem der Tauben, sehr lang und besitzt ebenso einen in zahlreichen Windungen um den Achsenfaden herumgelegten, durch Mazeration isolierbaren Spiralfaden, wie die Figuren 33 und 34 von der Kreuzotter dartun.

Amphibien. Im Gegensatz zu den Reptilien begegnen wir bei den Amphibien einer großen Mannigfaltigkeit der Samenkörper. Da die Spermien der Apoda noch wenig bekannt sind, kommen nur die Urodelen und Anuren in Betracht.

Die großen Samenkörper der geschwänzten Amphibien zeigen eine sehr charakteristische Zusammensetzung und zeichnen sich durch den Besitz einer schönen undulierenden Membran aus, deren Flimmerphänomen seit Czermak die Forscher schon oft gefesselt hat.

Figur 35 führt uns diesen Urodelentypus in dem Spermium eines Triton vor. Der Kopf ist lang, dünn und nadelförmig. Vorn läuft er allmählich in ein äußerst feines, mit einem Widerhaken versehenes Perforatorium (Sst) aus, welches sich nach hinten im Kopf zu einem Stützfaden verlängert. Auf den Kopf folgt ein kurzes zylindrisches Verbindungsstück (V), in welches sich der eigentliche Achsenfaden der Geißel aber nicht hinein erstreckt. Die nun folgende Geißel setzt sich aus dem Hauptfaden und der undulierenden Membran nebst Randfaden (Rf) zusammen. Der Hauptfaden führt in seinem Innern seiner ganzen Länge nach einen relativ dicken Achsenfaden, der von einer bisweilen einseitig verdickten Hüllsubstanz umgeben ist. An diesem Hauptfaden ist nun eine in zierliche, halskrausen-



Fig. 33 und 34. Zwei Spermien der Kreuzotter (Vipera berus L.): Fig. 34 nach 6-tägiger Mazeration in 0,75-prozentiger Kochsalzlösung. Sst als Perforatorium fungierendes Vorder- oder Spitzenstück des Kopfes, Hst Hinterstück des Kopfes, in Fig. 34 etwas gequollen, V Verbindungsstück, in Fig. 33 mit einem Protoplasmaanhang (P), H Hauptstück der Geißel. Nach E. Ballowitz, Untersuchungen über die Struktur der Spermatozoen. Teil III: Fische, Amphibien, Reptilien. Arch. f. mikrosk. Anat., Bd. XXXVI, Tafel XII, Fig. 79 u. 81.

Fig. 33. Fig. 34.

artige Umbiegungen gelegte Membran einseitig befestigt, deren wesentlichster Bestandteil ein Randfaden (Rf) ist, welcher ganz (Salamandra) oder zum größten Teil auch das hinterste Ende der Geißel bildet. Das Verhalten des Randfadens zum hinten sich verjüngenden Ende des Hauptfadens ist bei den einzelnen Gattungen verschieden. Auch kann sich am hinteren Ende des Hauptfadens noch ein kielartig wirkender „Steuer- oder Kielsaum" ausbilden, wie es beim Axolotl der Fall ist. Ballowitz hat betont, daß es auf keine Weise gelingt, an dem Achsenfaden eine feinere Struktur, etwa eine Zusammensetzung aus Fibrillen, nachzuweisen. Auch G. Retzius erwähnt, daß ihm dies bei seinen neuerlichen Untersuchungen nicht geglückt ist. Dagegen isolierte Ballowitz aus dem Randfaden der undulierenden Membran regelmäßig Elementarfibrillen, eine Beobachtung, welche inzwischen wiederholt, z. B. von R. Fick, bestätigt worden ist.

Diese Struktur steht in sehr bemerkenswerter Uebereinstimmung mit den Bewegungserscheinungen dieser eigenartigen Körper. Bei

der Bewegung krümmen sich nämlich diese Spermien zu einer flachen Spirale zusammen, wobei der Hauptfaden der Geißel nebst dem Kopfe, abgesehen von der Lokomotion, völlig bewegungslos bleibt. Dagegen biegt sich der Randfaden lebhaft seitlich ein, und es schreiten

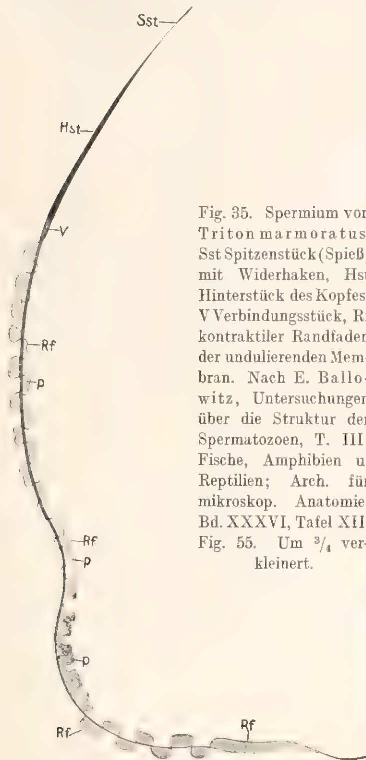


Fig. 35. Spermium von Triton marmoratus. Sst Spitzenstück (Spieß) mit Widerhaken, Hst Hinterstück des Kopfes, V Verbindungsstück, Rf kontraktiler Randfaden der undulierenden Membran. Nach E. Ballowitz, Untersuchungen über die Struktur der Spermatozoen, T. III: Fische, Amphibien u. Reptilien; Arch. für mikroskop. Anatomie, Bd. XXXVI, Tafel XII, Fig. 55. Um $^3/_4$ verkleinert.

diese schnell aufeinanderfolgenden, flimmernden Bewegungen von vorn nach hinten hin fort. Die Bewegung ist also hier in dem fibrillär strukturierten Randfaden lokalisiert, während der sonst kontraktile und fibrilläre Achsenfaden (s. oben bei den Säugetieren und Vögeln) gleichzeitig mit dem Verluste der Kontraktilität auch die fibrilläre Struktur eingebüßt hat. Es fallen hier also in sehr auffälliger Weise fibrilläre Struktur und Kontraktilität zusammen.

Von großem Interesse ist, daß sich an dem vorderen Ende des Randfadens ein bis zwei Körnchen vorfinden, welche der Geißel dicht hinter dem Kopf frei ansitzen und wegen ihrer Kleinheit schwer zu sehen sind. Dieses Körnchen wurde zuerst von Jensen und Ballowitz bei Triton gesehen und neuerdings auch von G. Retzius abgebildet; der letztere Forscher fand bei Salamandra sogar zwei dicht hintereinander gelegene Körnchen. Die Vermutung liegt nahe, daß in Analogie mit den Befunden bei anderen Spermien diese Körnchen Zentralkörperchen sind und als kinetische Zentren die Bewegungen des Randfadens der Geißel beherrschen und regulieren.

Es sei hervorgehoben, daß nach den Untersuchungen über die Spermiogenese dieser Gebilde insbesondere durch Meves das Verbindungsstück und Hauptstück des Urodelenspermiums den gleichnamigen Teilen der Säugerspermien nicht homolog sind. Vielmehr geht das „Verbindungsstück“ bei den Urodelen aus dem sich stark vergrößernden proximalen Zentralkörper oder Zentriol hervor, dem sich hinten der vordere Teil des distalen Zentriols anlagert, so daß dieser Abschnitt als „Zentriolenteil“ bezeichnet werden könnte. Der hintere Abschnitt des distalen Zentralkörpers rückt dagegen soweit nach hinten, als der dickere Teil des „Hauptstückes“ reicht; nur dieser letztere Abschnitt ist daher dem eigentlichen Verbindungsstück bei den Mammalien zu vergleichen.

Mit dieser typischen, allen Urodelen in den Grundzügen zukommenden Struktur kontrastiert in merkwürdiger Weise die große Mannigfaltigkeit der Spermienformen bei den Anuren. Man kann beinahe sagen, daß fast jede Gattung dieser Amphibienordnung ihre eigene, besondere Spermienform besitzt; ganz nahe verwandte Gattungen können dabei die verschiedenartigsten Samenkörper aufweisen. Die folgenden Beispiele mögen dies erläutern.

Am einfachsten sind die Samenkörper bei den Rana- und Hylaarten beschaffen, sie bestehen nur aus einem länglichen schmalen Kopf und einem relativ kurzen Schwanzfaden (Fig. 36). Der Kopf spitzt sich zu einem deutlich abgesetzten Perforatorium (Sp) zu, in welchem Bromann noch ein kurzes, stabförmiges Stützgebilde nachgewiesen hat (Fig. 36a bei Sp). An der Geißel ist ein vorderer dicker Abschnitt als Verbindungsstück (V) festzustellen, das aber allmählich ohne jede Grenze nach hinten hin in das Hauptstück übergeht; ein Endstück fehlt. An der Ansatzstelle der Geißel am Kopf hat G. Retzius zwei Zentralkörperchen beschrieben, welche nach diesem Forscher aber nebeneinander liegen, und nicht hintereinander, wie Bromann berichtet hat. Ballowitz fand im Sperma des Frosches regelmäßig lebhaft bewegliche, atypische Spermien mit rundlichem Kopf. Ganz anders sieht das Spermium der Knoblauchkröte (Pelobates fuscus) aus, welches einen langen, in mehreren Windungen spiralig gewundenen Kopf mit einem Vorbohrerstück besitzt. Das merkwürdigste ist, daß ein Verbindungsstück, wie Ballowitz nachwies, vollständig fehlt. An der Anheftungsstelle der aus zwei miteinander eng verbundenen

Fäden bestehenden Geißel fand G. Retzius einen länglichen Zentralkörper. Die Angabe von Bromann, daß hier zwei getrennte, hintereinander befindliche Zentralkörper liegen, konnte Retzius nicht bestätigen.

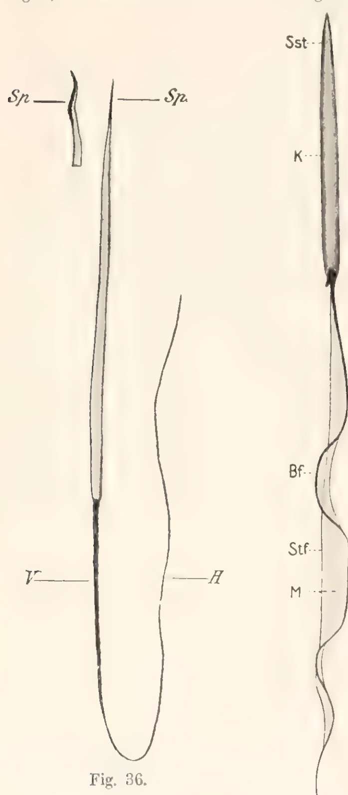


Fig. 36.

Fig. 37.

Fig. 36. Typisches Spermium von Rana muta Laur.; Sp Spitzenstück, H Hauptstück, V Verbindungsstück. Nach E. Ballowitz, Ueber das regelmäßige Vorkommen auffällig heteromorpher Spermien im reifen Sperma des Grasfrosches Rana muta Laur. Zool. Anzeiger, Bd. XXX, N. 23, 1906, Fig. 1 u. 1a.

Fig. 37. Spermium der gewöhnlichen Kröte (Bufo vulgaris Laur.). Stf Stützfaser, Bf Bewegungsfaser, M Membran zwischen beiden. K Kopf, Sst Spitzenstück des Kopfes. Nach G. Retzius, Biolog. Unters., N. F., Bd. XIII, 1906, Tafel XXIV, Fig. 1. Um $^2/_3$ verkleinert.

Hiervon unterscheiden sich wieder die echten Krötenarten (Bufo und Alytes) dadurch, daß (Fig. 37) ihre Spermiumgeißel sich aus einer Stützfaser und einer kontraktilen, krausenförmig eingebogenen Bewegungsfaser zusammensetzt, die, ähnlich wie bei den Urodelen (s. oben), durch eine breite, dünne Membran miteinander verbunden sind. Auch die eigenartigen Samenkörper der Feuerunke (Bombinator igneus; Fig. 38) besitzen diesen undulierenden Apparat, nur sind die Geißel und der mit deutlichem Stützfaden versehene Kopf nicht hintereinander, sondern nebeneinander befestigt; das vordere Ende der Geißel trägt zwei seitlich dem Kopf angefügte Zentralkörper (Fig. 38).

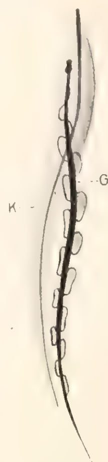


Fig. 38. Spermium der Feuerunke, Bombinator igneus Rös. K Kopf, G Geißel. Nach G. Retzius, Biolog. Unters., N. F., Bd. XIII, 1906, Tafel XXVII, Fig. 12. Um $^1/_3$ verkleinert.

Die wunderbarste, $2^1/_4$ mm lange Spermienform besitzt aber Discoglossus pictus. Der in vielen Spiralwindungen gedrehte Kopf ist enorm lang, während die Geißel in ganzer Ausdehnung einen schmalen undulierenden Saum aufweist. Die nur kleinen Samenkörper des nahe verwandten Anuren Pelodytes punctatus Bonap. gleichen wieder mehr denjenigen der Bufoniden.

Fische. Unter den Fischen weisen die Knochenfische die kleinsten Samenkörper auf, die zugleich sehr hinfällig sind und bei der äußeren Befruchtung im Wasser bald absterben. So erhält sich nach Henneguy die normale Geißelbewegung der Forellenspermien nur 30 Sekunden; in der unverdünnten Samenmilch fehlt den Körpern noch die Beweglichkeit, welche erst bei hinreichender Verdünnung mit Wasser eintritt.

Die kleinen Köpfe der Samenkörper der Teleostier (Fig. 39 bis 43) sind meist rundlich oder annähernd rundlich. Nur bei wenigen Arten wurde bisher eine davon abweichende Kopfform gefunden, so von Ballowitz bei Zoarces eine abgeplattete, löffelförmige und von G. Retzius bei Lophius eine fast beilförmige. Dem Kopfe liegt kelchartig ein kleines, kurzes, plattes Verbindungsstück (V) an, in welchem sich

nach Retzius runde Körner befinden. Das Verbindungsstück durchsetzt den Achsenfaden der Geißel und inseriert seitlich und exzentrisch mit einem in die Kopfsubstanz eingebetteten Zentralkörperchen (Fig. 41 bis 43). Die sehr zarte, lebhaft schlagende Geißel (Fig. 39 und 40) besteht aus einer Hülle und aus einem feinen Achsenfaden, der bei einigen Arten (Fig. 40) als deutliches Endstück (E) am hinteren Ende hervortritt.

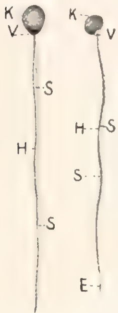


Fig. 39. Spermium vom Hecht. K Kopf, V Verbindungsstück, H Hauptstück, S Geißelsaum. Nach E. Ballowitz, Untersuchungen über die Struktur der Spermatozoen, Teil III: Fische, Amphibien und Reptilien; Arch. für mikroskopische Anatomie, Bd. XXXVI, Tafel XI, Fig. 14.

Fig. 40. Spermium vom Flußbarsch. E Endstück der Geißel, sonst wie in Fig. 39. Nach E. Ballowitz, ibidem, Fig. 21.



Fig. 41. Spermiumkopf mit vorderem Geißelende bei Seitenansicht der Geißelinsertion vom Hecht. V Verbindungsstück. Nach E. Ballowitz, ibidem, Fig. 43.

Fig. 42 und 43. Zwei Spermiumköpfe mit vorderem Geißelende von Leuciscus rutilus L. V Verbindungsstück. Fig. 43 bei Seitenansicht der Geißelinsertion. Nach E. Ballowitz, ibidem, Fig. 46 u. 47.

Manche Knochenfische (Hecht, Barsch, Fig. 39 und 40) besitzen dann noch am Hauptstück der Geißel einen schmalen, zarten, nicht beweglichen und auch nicht fibrillären, einseitig angehefteten Saum (S) ohne Randfaden. Auch hier wurde von Ballowitz in dem Achsenfaden eine fibrilläre Struktur aufgefunden.

Auch bei den Ganoiden sind die Samenkörper, soweit bisher bekannt, nur klein; der Kopf der Störspermien ist kurz zylindrisch mit einfachem Spitzenstück.

Im Gegensatz hierzu haben die Selachier (Chimaera, Rochen und Haie) sehr große Spermien mit langem, schmalem, spiral gedrehtem Kopf (Fig. 44), auf welchen ein kurzes Verbindungsstück folgt. Die Geißel besteht aus zwei miteinander verbundenen, in eigenartiger Weise umeinander gedrehten Fäden (Fig. 44). Der Anfang des Hauptstückes der Geißel wird gewöhnlich von einem zylindrischen Protoplasmakörper (P) umgeben. Im Innern des Spermiumkopfes wurde von G. Retzius bei Rochen und Haien kürzlich ein Spiralfaserapparat aufgefunden (vgl. auch bei Petromyzon.)

Einen sehr eigenartigen Kopfanhang stellte Ballowitz unter den Cyclostomen an den Samenkörpern des Flußneunauges (Petromyzon fluviatilis L.) fest (Fig. 45). Der

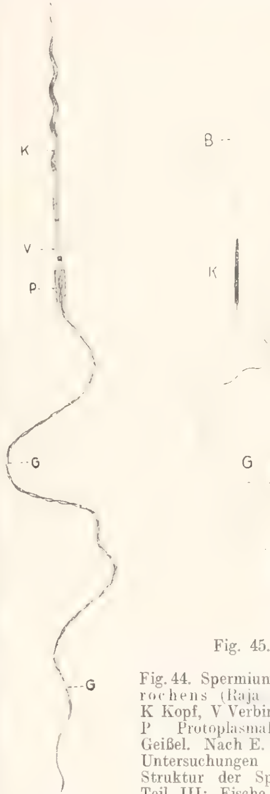


Fig. 44. Spermium des Nagelrochens (Raja clavata L.). K Kopf, V Verbindungsstück, P Protoplasmakörper, G Geißel. Nach E. Ballowitz, Untersuchungen über die Struktur der Spermatozoen. Teil III: Fische, Amphibien und Reptilien, Arch. f. mikroskop. Anatomie, Bd. XXXVI, Tafel XI, Fig. 1. Um $^4/_5$ verkleinert.

Fig. 45. Spermium des Flußneunauges (Petromyzon fluviatilis L.). B Kopfborste, K Kopf, G Geißel. Nach E. Ballowitz, Ueber die Spermien des Flußneunauges (Petromyzon fluviatilis L.) und ihre merkwürdige Kopfborste, Arch. f. mikroskop. Anatomie, Bd. 65, 1904. Tafel VII, Fig. 1. Um $^1/_3$ verkleinert.

stäbchenförmige Kopf trägt an seiner Spitze eine sehr lange und sehr feine, elastische Borste (B), welche mehrmals länger ist als der in seiner Form etwas variable Kopf (K). In dem zur Quellung gebrachten Kopf ließ sich eine feine, oft wellig gebogene Faser (Fig. 46; vgl. oben bei Selachiern und unten bei den Mollusken) nachweisen und am hinteren Ende des Kopfes ein Zentralkörperapparat (Fig. 46).

Fig. 46. Kopf und vorderes Geißelende eines Spermiums vom Neunauge (Petromyzon fluviatilis). Die Kopfborste ist abgefallen. Der Kopf ist gequollen, so daß die in ihm gelegene, spiralig verlaufende Kopffaser deutlich geworden ist. Nach E. Ballowitz, ibidem, Fig. 30.

Diese Kopfborste bietet ein sehr hohes Interesse mit Bezug auf die am durchsichtigen Petromyzonei unter dem Mikroskop leicht zu beobachtenden Befruchtungsvorgänge, bei welchen von mehreren Beobachtern auffällige Bewegungserscheinungen des Eiprotoplasmas gesehen und auf eine „Fernwirkung" der radiär um das Ei geordneten Samenkörper bezogen wurden. Diese „Fernwirkung" erklärt sich wohl in sehr einfacher Weise durch die den früheren Beobachtern entgangene Kopfborste, welche bei ihrer Länge früher als der eigentliche Kopf in das Eiprotoplasma eindringen muß und dem letzteren wohl den Anreiz zu seinen Bewegungsphänomenen gibt. Auch läßt sich denken, daß das sich kontrahierende Eiprotoplasma in der Kopfborste gewissermaßen eine Handhabe erhält, um das ganze Spermium zu sich in das Eiinnere zu ziehen, da alle Aktion des Schwanzes aufhört, sobald der Kopf in die Eihaut eingedrungen ist. Hier würde also noch eine besondere Funktion des Kopfborstenperforatoriums vorliegen.

Die Spermien der Leptocardier (Amphioxus) sind nach den Feststellungen von G. Retzius mit einem rundlichen Kopf, einem flachen Spitzenstück des Kopfes und einer dünnen Geißel mit Endstück versehen; der Achsenfaden durchsetzt ein flaches Verbindungsstück.

3. **Die Nematospermien der Wirbellosen.** Noch weit mannigfaltiger gestaltet als die im vorigen Abschnitt geschilderten Nematospermien der Wirbeltiere sind diejenigen der Wirbellosen. Dazu kommt die bisher in ihrer Bedeutung noch unaufgeklärte Tatsache, daß an den Samenkörpern mancher Wirbellosen die Bestandteile nicht nachweisbar sind, welche als bei der Befruchtung wesentlich angesehen und bei den Spermien der Wirbeltiere allgemein angetroffen werden, z. B. die Zentralkörper und der Nebenkernapparat des Verbindungsstückes, welcher z. B. den Spermien der Insekten meist zu fehlen scheint, wenigstens an den ausgebildeten Spermien sich nicht nachweisen läßt; sogar ein abgesetzter Kopf ist bei manchen Spermien (s. unten, z. B. Cirripedien) nicht vorhanden, so daß es außerordentlich schwer hält, in ihnen das vom Kern stammende Chromatin zu erkennen. Bei anderen Formen ist das letztere so winzig, daß es gegen die oft ungeheuer lange Geißel ganz verschwindet.

Bei manchen Wirbellosen (s. unten) kommen in demselben Tier zwei oft sehr differente Spermienformen nebeneinander vor, von denen die eine den gewöhnlichen Samenkörpern entspricht und einen gut ausgebildeten, aus Chromatin bestehenden Kopf besitzt, während die andere sehr abweichend gestaltet ist und entweder kein Chromatin oder nur sehr wenig davon enthält. Meves hat die erstere als „eupyrene" und die letztere als „apyrene" oder „oligopyrene" Spermien bezeichnet. Die physiologische Bedeutung dieses Dimorphismus, welcher von v. Siebold 1836 zuerst bei der Süßwasserschnecke Paludina vivipara entdeckt wurde, ist noch dunkel.

Es kann hier nicht die Aufgabe sein, die Spermienformen aller Klassen und Ordnungen der Wirbellosen vorzuführen. Vielmehr sollen nur die Mollusken, Arthropoden, Würmer und Echinodermen mit Auswahl berücksichtigt werden, da diese bisher am meisten durchforscht sind und auch die interessantesten Formen aufweisen, während die Spermien der Coelenteraten mit einzelnen Ausnahmen vom allgemeinen Typus kaum abweichen. Um die Kenntnis der Samenkörper der marinen Wirbellosen, vor allem der Mollusken und Würmer, hat sich besonders G. Retzius verdient gemacht, welcher in der Lage war, wiederholt längere Zeit in biologischen Stationen an der Meeresküste zu weilen und dort die oft sehr verschiedenen Brunstzeiten der Meerestiere abzupassen.

Fadenspermien der Mollusken. Die einfachsten und zugleich auch kleinsten Samenkörper, deren Ausbildung auf einem primitiven Stadium stehen geblieben ist, besitzen unter den Mollusken die Amphineuren und Lamellibranchiaten. Ein meist rundlicher, bisweilen auch länglicher Kopf mit verschieden großem Spitzenstück trägt eine feine Geißel, an deren Ende ein Endstück abgesetzt ist. An der Hinterfläche des Kopfes entdeckte G. Retzius einen Kranz von 4 bis 5, selten mehr, kugeligen, färbbaren Körnern, welche die Geißelinsertion umstellen und als eine Art Nebenkernorgan anzusehen sind. Diese Körner bilden in ihrer Gesamtheit das schon früheren Untersuchern bekannte Verbindungsstück dieser Spermien.

Diese Entdeckung von G. Retzius kann ich nach 1904 gemachten, nicht publizierten Beobachtungen an Mya, Ostrea, Unio und Dreissena bestätigen. Bei Ostrea fand ich 5, bei Unio ebenso viele, seltener 6, rundliche Körner, die bei letzterem Mollusk bisweilen ungleich groß waren. Die Figuren 47 und 48 stellen die Köpfe nebst vorderem Geißelteil

von Dreissenaspermien dar. Dem länglichen Kopf sitzt ein kegelförmiges Spitzenstück auf, welches in seinem Innern ein isolierbares Stäbchen (Fig. 48) führt. Der Geißelansatz wird am hinteren Ende des Kopfes von 4 rundlichen, glänzenden Körnern, den Nebenkernderivaten umgeben, auf welche

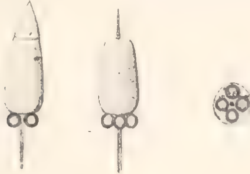


Fig. 47. Fig. 48. Fig. 49.

Fig. 47 bis 49. Spermien von Dreissena polymorpha Pall. Fig. 47 und 48. Kopf und vorderes Geißelende zweier Spermien; in Fig. 48 ist das Stäbchen aus dem Spitzenstück isoliert. Fig. 49. Hintere Kopffläche mit den vier Körnern und der Geißelinsertion dazwischen. Nach E. Ballowitz (bisher nicht publizierte Originalzeichnungen des Verfassers).

man in Figur 49 von hinten her blickt. Besonders zahlreich fand G. Retzius die Körner bei Modiola, deren Spermien dadurch ein besonders zierliches Ansehen erhalten (Fig. 50 und 51).

Die gleichen, wenig spezialisierten Spermien führen nach G. Retzius auch noch mehrere Gastropoden (Haliotis, Astralium, Gibbula u. a.), während bei anderen eine weitere Differenzierung eingetreten ist. G. Retzius unterscheidet bei den Gastropoden, außer der geschilderten, noch drei andere Spermienformen und macht den Versuch, diese spermatologischen Befunde auch für die systematische Einteilung der Mollusken zu verwerten. Bei den Vermetidae, Cypraeidae, Turritellidae, Paludinidae und mehreren anderen Familien fand der genannte Autor fadenförmige Spermien mit mehr oder weniger lang ausgezogenem Kopf mit Spitzenstück (Fig. 53), deren Geißel ein langes Verbindungsstück besitzt, auf welches ein längeres Hauptstück ohne Endstück folgt. An dem vorderen und hinteren Ende des Verbindungsstückes befindet sich ein quergestellter Zentralkörperring. Die Spermien der dritten Gruppe (Buccinidae, Conidae, Littorinidae u. a.; Fig. 55) ähneln den vorigen, besitzen aber einen den ganzen Kopf bis zum Spitzenstück zentral durchsetzenden, geraden, bei Anschwellung des Kopfes sich spiralig windenden Faden, welcher sehr an den von Ballowitz bei Petromyzon beschriebenen Kopffaden erinnert.

Der vierte Typus findet sich bei Vertretern



Fig. 50.

Fig. 50. Spermium von Modiola modiolus. Nach G. Retzius, Biol. Unters., N. F., Bd. XI, 1904, Tafel X, Fig. 9. Um $^2/_3$ verkleinert.



Fig. 51.

Fig. 51. Kopf des Spermiums von Modiola modiolus, von unten gesehen. Nach G. Retzius, ibidem, Fig. 12. Um $^2/_3$ verkleinert.



Fig. 52.

Fig. 52. Vorderende eines Spermiums von Doris tuberculata. Sst Spitzenstück des Kopfes, in dessen hinteren Teil ein mit einem Endknopf (Zentralkörper) gekröntes Stiftchen hineinragt. Nach E. Ballowitz, Internat. Monatsschr. für Anat. u. Physiol., 1894, Bd. XI, Tafel XII, Fig. 33.

der Opisthobranchier und Pulmonaten und setzt sich aus einem kleinen, ovalen oder konischen, oft mehr oder weniger spiralig gedrehten Kopf (Fig. 52) und einer langen Geißel zusammen. Die letztere ist durch ein sehr langes, am vorderen Ende mit einem Zentralkörperring versehenes Verbindungsstück ausgezeichnet. Dieses besteht aus einem zentralen, von einer Hülle umgebenen Achsenfaden und einem diesen Faden in bestimmter Richtung vielfach umwindenden äußeren Spiralfaden; auch die Hülle des Achsenfadens kann eine spiralig gewundene Struktur zeigen. Wie Ballowitz schon 1894 von Doris tuberculata abgebildet hat (Fig. 52), ragt in den hinteren Teil des Kopfes ein mit einem Endköpfchen (Zentralkörper) gekröntes Stiftchen hinein.

Wie oben erwähnt, kommt bei manchen Mollusken, vor allem den Prosobranchiern, ein eigenartiger Dimorphismus der Spermien vor, wovon die Figuren 53 bis 56 zwei Beispiele nach G. Retzius vorführen und zwar Figur 53 und 54 von Paludina vivipara, hier von v. Siebold entdeckt, und Figur 55 und 56 von Fusus despectus. Beide Spermienformen finden sich regelmäßig im Sperma nebeneinander vor. Die eupyrenen Formen (Fig. 53 und 55), von v. Siebold als

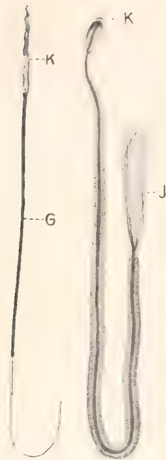


Fig. 53. Fig. 54.

Fig. 53. Eupyrenes Spermium von Paludina vivipara. K Kopf, G Geißel. Nach G. Retzius, Biol. Unters., Bd. XII, 1905, Tafel XVIII, Fig. 2. Um $^3/_4$ verkleinert.

Fig. 54. Oligopyrenes Spermium von Paludina vivipara. K Kopf, M Mittelstück. J Faserbüschel. Nach G. Retzius, ibidem, Fig. 6. Um $^3/_4$ verkleinert.

„Fadenform“ bezeichnet, repräsentieren den gewöhnlichen Typus mit wohlcharakterisiertem Kopf (K). Die oligopyrene, resp. apyrene Form, „Wurmform“ nach v. Siebold, ist besonders bei Paludina (Fig. 54) merkwürdig und ganz abweichend gestaltet. Der Kopf (K) ist auf das sichelförmige, kleine Stück reduziert, welches mützenartig dem verbreiterten vorderen Ende aufsitzt. Der dicke große Mittelteil besteht aus einem Achsenstrang, der von einer körnig strukturierten Mantelschicht umgeben ist und an seinem hinteren Ende ein Büschel von 8 bis 12 beweglichen, isolierten, gleichlangen, cilienartigen Fäden trägt. Die zweite Spermienform von Fusus (Fig. 56) ist völlig kernlos, apyren; von der Oberfläche der langen Spindel lassen sich durch Mazeration zahlreiche Fibrillen ablösen. M. von Brunn, Brock und neuerdings G. Retzius haben diesen Dimorphismus der Samenkörper bei einer ganzen Anzahl von Mollusken, insbesondere bei marinen, festgestellt. Zu erwähnen ist noch, daß der letztere Forscher bei Turritella terebra L. auch eine paarweise Verkuppelung der Spermienköpfe angetroffen hat, ähnlich derjenigen, welche Selenka bei Didelphys (s. oben) und Ballowitz bei den Dytisciden (s. unten) aufgefunden haben.

Was schließlich noch die Cephalopoden anbetrifft, so ist an den Samenkörpern von Sepia das kurze, widerhakenartige Verbindungsstück bemerkenswert, welches aus einer Mantelschicht und einem spornartig nach hinten einseitig vorragenden Innenkörper besteht. An dem Achsenfaden der Geißel fehlt ein Endknöpfchen (Zentralkörper).

Fadenspermien der Arthropoden. Von ihnen sind diejenigen der Insekten, insbesondere der Coleopteren, am genauesten bekannt geworden. Sie bestehen aus einem Kopf und einer Geißel. Das Verbindungsstück welches bei den bisher betrachteten Fadenspermien als Nebenkernapparat meist ansehnlich ausgebildet ist, fehlt ihnen vollständig. Bei einigen Formen wurden von Ballowitz und G. Retzius am vorderen Ende der Geißelfäden färbbare, dunklere Pünktchen gesehen, von denen durch neuere

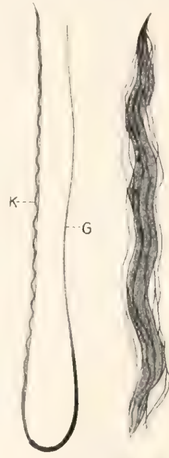


Fig. 55. Fig. 56.

Fig. 55. Eupyrenes Spermium von Fusus despectus L. K Kopf, G Geißel. Die Substanz des Kopfes ist durch Mazeration etwas angeschwollen und läßt einen spiralig verlaufenden Zentralfaden erkennen. Nach G. Retzius, Biol. Unters., N. F., Bd. XIII, 1906, Tafel VIII, Fig. 2. Um $^3/_4$ verkleinert.

Fig. 56. Apyrenes Spermium von Fusus despectus L. Nach G. Retzius, ibidem, Fig. 9. Um $^3/_4$ verkleinert.

spermiogenetische Untersuchungen wahrscheinlich gemacht ist, daß es sich in ihnen um Zentralkörper oder deren Derivate handelt. Auch der Kopf ist gewöhnlich nur einfach aus einem nadelförmigen Hinterstück und einem kleinen Spitzenstück, dem Perforatorium, aufgebaut.

Um so komplizierter sind aber die Geißeln strukturiert: sie stellen förmliche, aus mannigfachen Fasern und Fibrillen zusammengefügte Bewegungsmaschinen dar. Ballowitz unterscheidet nach der Beschaffenheit der Geißelfäden zwei verschiedene Typen von Spermien. Bei der einen Gruppe (Fig. 57 bis 59) findet sich eine steife, nicht kontraktile und auch nicht fibrillär spaltbare Stützfaser (Stf), welcher auf einer Seite eine mit ihrem Rande krausenförmig umgebogene, platte Bewegungsfaser (KS) angeheftet ist; diese zeigt im Leben ein schönes, von vorn nach hinten fortschreitendes Flimmerphänomen, was um so beachtenswerter ist, als sonst Flimmerphänomene bei den Insekten fehlen. Stützfaser (Stf) und Flimmerfaser (KS) lassen sich leicht voneinander isolieren (Fig. 58). Die letztere

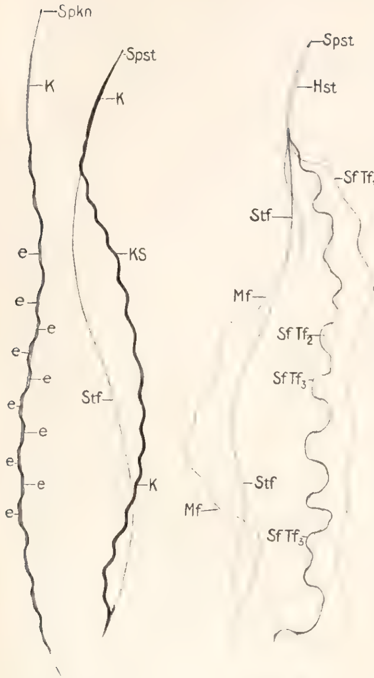
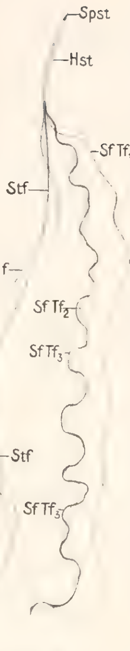



Fig. 57. Fig. 58. Fig. 59.

Fig. 57. Spermium eines Rüsselkäfers (Hylobius abietis L.). K Kopf, Spkn Spitzenknopf des Spitzenstücks Spst, bei e, e, e, die krausenförmigen Umbiegungen des Flimmersaumes. Nach E. Ballowitz, Untersuchungen über die Struktur der Spermatozoen, zugleich ein Beitrag zur Lehre vom feineren Bau der kontraktilen Elemente. Die Spermatozoen der Insekten. I. Coleopteren, Zeitschr. f. wissensch. Zool., Bd. L, 1890, Tafel XII, Fig. 1. Um $^1/_4$ verkleinert.

Fig. 58 und 59. Zwei Spermien von Chrysomela sanguinolenta mit der durch Mazeration in ihreFasern zerlegten Geißel. K Kopf, Spst Spitzenstück, Stf starre Stützfaser, KS flimmernder Krausensaum, Mf Mittelfaser, $SfTf_1$, $SfTf_2$ und $SfTf_3$ die 3 Teilfasern der Saumfaser. In Fig. 58 hat sich der Flimmersaum von der Stützfaser getrennt. Fig. 59 zeigt die 3 Teilfasern der Saumfaser. Nach E. Ballowitz, ibidem, Tafel XIII, Fig. 35 und Fig. 41. Um $^1/_4$ verkleinert.

läßt sich nun wieder in 3 bis 4 schmale, bandförmige Fasern (Mf, $SfTf_1$, $SfTf_2$, $SfTf_3$) zerlegen (Fig. 59), welche durch auflösbare Kittsubstanz miteinander verbunden sind und parallel nebeneinander liegen. Sie durchziehen den ganzen Flimmersaum vom Kopf bis in das äußerste Geißelende hinein und sind so nebeneinander geordnet, daß die Mittelfaser (Mf) sich an die Stützfaser anheftet, dann die erste und zweite Saumteilfaser (Sf Tf_1 und Sf Tf_2) kommen und schließlich eine dritte Saumteilfaser (Sf Tf_3) den freien Rand des Krausensaumes bildet, wofür manche Chrysomeliden ein Beispiel liefern. Diese Fasern des Flimmersaumes lassen sich dann schließlich noch in feinste Elementarfibrillen auflösen.

Der zweite Spermientypus der Coleopteren (Fig. 60 bis 62) ist durch das Fehlen der starren Stützfaser gekennzeichnet. Schon die äußere Erscheinung (Fig. 60) ist dadurch eine andere, daß die Geißel dieser Spermien gewöhnlich die Form einer aus mehreren Windungen bestehenden Spirale hat, in deren Verlaufe sehr häufig größere, unregelmäßige Einbiegungen auftreten. Die Bewegung der Geißel nähert sich mehr der schlagenden. Auch die Geißel dieser Spermien besteht aus drei schmal-bandförmigen, parallel nebeneinanderliegenden Fasern, einer Randfaser (Rf), einer Mittelfaser (Mf) und einer Saumfaser (Sf); dazu kommt bei manchen, z. B. Hydrophilus, noch eine vierte Faser, die Wimpelfaser (Wf), welche dem Kopfe sehr fest ansitzt, weit kürzer als die anderen Fasern ist und nach hinten hin sich fein zuschärft. Diese läßt sich nicht in Fibrillen zerlegen, während die anderen Fasern durch Mazeration in meist zahlreiche Fibrillen zerfallen.

Gemeinsam für die zwei Spermientypen ist demnach, daß beide aus drei selbständigen Hauptfasern zusammengesetzt sind, einerseits der Stützfaser, Mittelfaser und Saumfaser, andererseits der Randfaser, Mittelfaser und Saumfaser. Da Uebergänge in der Ausbildung der starren Stützfaser bis zur weichen Randfaser angetroffen werden, ist es wahrscheinlich, daß auch die Stützfaser und Randfaser trotz ihrer differenten Struktur und verschiedenen Funktion einander gleichwertig sind. Eine der interessantesten Uebergangsformen wurde bei Copris gefunden, wo der vordere größere Teil der Geißel eine starre Stützfaser und daran einen Flimmersaum besitzt, während ihr hinterer Abschnitt weich ist und auch schlagende Bewegungen ausführt. Auch bei den übrigen Insektenordnungen läßt sich die Zusammensetzung des oft sehr langen Spermienschwanzes aus drei Fasern feststellen, von welchen die kontraktilen fibrillär strukturiert sind.

Eine Sonderstellung nehmen die bei manchen Arten über einen Millimeter langen Spermien gewisser Schwimmkäfer (Dyticiden) ein, insofern, als sie mit den Köpfen paarweise fest vereinigt sind (Fig. 63). Bei Dyticus (Fig. 63) sind die Einzelköpfe mehr messerartig gestaltet und mit einem Widerhaken versehen, während die Kopfform von Hydati-

cus, Acilius und anderen verwickelter und mehr tütenartig erscheint. Auch hier liegt in der Geißel eine fädige und fibrilläre Struktur vor, ebenso läßt sich an ihrem vorderen Ende hinter dem Kopf eine kurze, zugeschärft aufhörende Faser nachweisen.

Es sei erwähnt, daß Meves bei einem Schmetterling (Pygaera bucephala) im Hoden neben eupyrenen Spermien eine zweite apyrene Spermienform aufgefunden hat (vgl. oben die Mollusken).

Auf die Fadenspermien der Myriopoden und Arachniden erübrigt sich näher einzugehen, da ihre feinere Struktur noch zu wenig bekannt ist. Es sei nur erwähnt, daß unter den Tausendfüßern (Myriopoda) die Samenkörper der Chilopoden sehr lang sind und eine ausgesprochene Spiralstruktur in Kopf und Geißel aufweisen.

Auch bei zahlreichen Ordnungen der branchiaten Arthropoden, den Krebstieren, sind fadenförmige Spermien nachgewiesen worden, die bisweilen höchst absonderlich gestaltet sind. Sie kommen bei den Ostracoden, Branchiuren, Cirripedien, Amphipoden, Isopoden und Schizopoden vor. Die einfachste Gestalt zeigen sie bei den Cirripedien, indem sie einfache, kurze, lebhaft kontraktile Fäden (Fig. 64) bilden, die auch nicht die geringste Andeutung eines Kopfes zeigen. Durch Mazeration gelingt es, den Faden in zwei verschiedene Fasern zu zerlegen, von denen die eine etwas länger ist und aus zahlreichen Fibrillen (Fig. 65) besteht, während die andere, eine Spur dickere Faser sich mit Anilinfarben etwas intensiver färbt. Weder E. Ballowitz noch G. Retzius wollte es bei der Feinheit der Fäden anfangs glücken, den Kernbestandteil nachzuweisen, und beide Forscher sprachen die Vermutung aus, daß möglicherweise die dickere Faser das chromatinhaltige Kernderivat darstelle. Erst durch Anwendung der Biondischen Färbung gelang es Koltzoff und später G. Retzius, die dickere Faser grünlich zu tingieren, während die fibrilläre Faser dabei eine rote Färbung annimmt; hieraus kann geschlossen werden, daß die erstere das Kernderivat des Cirripedienspermiums darstellt, und daß diese Spermien, wenn auch kopflos, so doch nicht ohne Chromatinsubstanz sind. Die

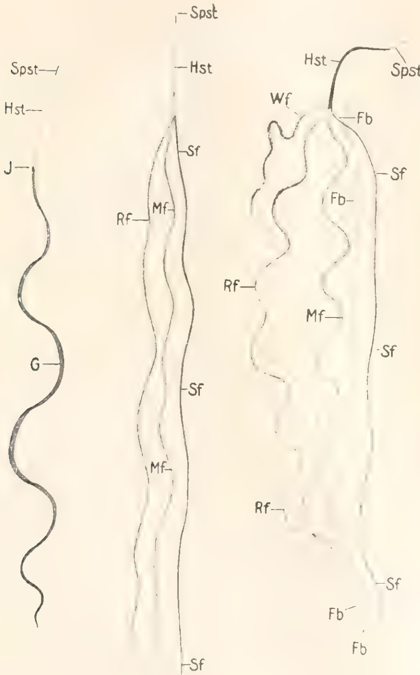


Fig. 60. Spermium von Hydrophilus piceus L. Spst Spitzenstück, Hst Hinterstück des Kopfes, J Insertionsstelle der Geißel (G) mit intensiver gefärbten, punktförmigen Stellen. Nach E. Ballowitz, ibidem, Tafel XIV, Fig. 46. Um 1/4 verkleinert.

Fig. 61 und 62. Zerfallstadien der Spermiumgeißel von Hydrophilus piceus L. In Fig. 61 ist die Geißel in die drei dicht nebeneinander liegenden Hauptfasern zerfallen, die Randfaser (Rf), die Mittelfaser (Mf) und die längere, gebogene Saumfaser (Sf). In Fig. 62 hat sich dazu noch die kürzere Wimpelfaser (Wf) abgelöst. Außerdem sind zwischen der Saumfaser (Sf) und Mittelfaser (Mf) noch zwei feinste, parallel nebeneinander liegende Fibrillen (Fb) zur Ablösung gekommen. Die Randfaser (Rf) und Mittelfaser (Mf) haben sich vom Kopfe abgelöst, während die Wimpelfaser (Wf) und Saumfaser (Sf) daran sitzen geblieben sind. Nach E. Ballowitz, ibidem, Tafel XIV, Fig. 52 u. 59. Um 1/4 verkleinert.

haarförmigen Samenkörper der Isopoden, Amphipoden und Schizopoden sind noch dadurch ausgezeichnet, daß sie einen, dem einen Ende des Haares unter spitzem Winkel



Fig. 63. Kopulierte Köpfe und freie, mit Flimmersaum versehene Anfangsstücke der beiden Geißeln eines Doppelspermiums aus dem Vas deferens von Dyticus marginalis L. Nach E. Ballowitz, Die Doppelspermatozoen der Dyticiden. Zeitschr. f. wissensch. Zoologie, Bd. LX, 1895, Tafel XXVIa Fig. 52. Um 1/4 verkleinert.





Fig. 64. Fig. 65.

Fig. 64. Kopfloses Spermium eines Cirripeds, Balanus improvisus. Nach E. Ballowitz, Die kopflosen Spermien der Cirripedien (Balanus). Zeitschr. f. wissensch. Zoologie, Bd. XCI, Tafel XVII, Fig. 1.

Fig. 65. Desgl. Das Spermium ist in zwei Fasern der ganzen Länge nach zerlegt, eine längere dünnere und eine kürzere dickere. Die dünnere Faser ist durch Mazeration in zahlreiche Fibrillen zerfallen. Nach E. Ballowitz, ibidem Fig. 18.

angehefteten Schlauch oder Strang besitzen, welcher dem Kopfe (Kern) des Spermiums ganz oder doch zum Teil entspricht (Fig. 66). G. Retzius hat diese eigenartige Form als „Wimpeltypus" bezeichnet. Bei den Schizopoden ist das Kopfanhängsel ganz anders und viel komplizierter gebaut, als bei den Isopoden und den Amphipoden.



Fig. 66. Spermium, eines Amphipoden, Caprella linearis L. „Wimpeltypus". Der blattförmig abgeplattete Schwanz ist von der schmalen Kante gesehen gezeichnet. Nach G. Retzius, Biol. Unters., N. F., Bd. XIV, 1909, Tafel VII, Fig. 1. Um 2/3 verkleinert.

Das wunderbarste Nematospermium aber wohl unter allen Tieren besitzen die Ostracoden (Muschelkrebse), wenn auch die Samenkörper bei den verschiedenen Ostracodengattungen sehr differente Formen und Strukturen aufweisen. Die Ostracodenspermien sind in mehrfacher Beziehung eigenartig (Fig. 67). Zunächst sind die Gebilde von so bedeutender Größe, daß sie bei manchen Arten in gerade gestrecktem Zustande die Gesamtlänge des ganzen Muschelkrebses um das mehrfache übertreffen. Sie sind daher gezwungen, in den Vasa deferentia des Männchens sowie in den Receptacula seminis des Weibchens nur in zusammengebogener Stellung zu liegen. Sodann ist ihre Zusammensetzung eine äußerst komplizierte (Fig. 67). Die Spermien der Gattung Cypris zerfallen in einen vorderen dickeren und hinteren dünneren Teil, welche beide von einer dünnen, mit einer Spiralstruktur versehenen, vermutlich chitinösen, ablösbaren Hülle umgeben sind. Ebenso kommt beiden ein dickerer, tingibler Spiralfaden zu, welcher sich im hinteren Abschnitt gerade streckt und hier dicht unter der Hülle gelegen ist. Dazu ge-



Fig. 67. Vorderes Ende des Samenkörpers eines Ostracoden (Muschelkrebses), Candona candida O. F. Müller. Man sieht die Hülle, die beiden Spiralbänder, den Spiralfaden und den Achsenstrang; die beiden letzteren dringen nicht bis zur vorderen Spitze vor. Nach G. Retzius, Biol. Unters., N. F., Bd. XIV, 1909, Tafel II, Fig. 4. Um ½ verkleinert.

sellen sich im vorderen dicken Abschnitt noch zwei dicht unter der Hülle in zahlreichen Windungen nebeneinander verlaufende Spiralbänder und ein Achsenstrang, um welchen sich der oben erwähnte Spiralfaden herumschlingt. Schließlich ist die Deutung, welche von diesen Teilen dem chromatinhaltigen Kopf, den Zentralkörpern und dem Nebenkernapparat entsprechen, so schwierig, daß G. Retzius, welcher diese wunderbaren Gebilde kürzlich näher studierte, ganz auf eine Deutung verzichtet hat, bevor nicht ihre Entstehung nach den neuen Methoden untersucht ist.

Nematospermien der Würmer. In dem Stamm der Würmer sind die Fadenspermien, mit Ausnahme der Nematoden, vorherrschend. Die primitivste Spermienform besitzen merkwürdigerweise die im System hochstehenden marinen Borstenwürmer, die Polychäten, deren Spermien auffallend denjenigen der Lamellibranchiaten unter den Mollusken ähneln, da sie an der Hinterfläche des Kopfes einen Körnerkranz des Nebenkernapparates führen. Ihnen gleichen nach G. Retzius die Samenkörper der Gephyreen und Brachiopoden, während die entsprechenden Gebilde bei den Bryozoen schon höher differenziert sind und ein langes, fädig strukturiertes Verbindungsstück aufweisen. Die Figuren 68 und 69 sind verkleinerte Kopien Retziusscher Abbildungen von Kopf und vorderem Geißelende eines marinen Borstenwurmes (Nephthys spec.). Figur 68 zeigt den Kopf von der Seite, so daß zwei der vier glänzenden, runden Körner sichtbar sind, welche nach Auflösung des mit plattem Spitzenstück versehenen Kopfes im Zusammenhang mit der Geißel das zierliche Bild der Figur 69 darbieten; am Geißelende befindet sich nach G. Retzius noch ein kleines Endknöpfchen, wohl ein Zentralkörperchen. Die Körner werden durch eine spärliche, sie in dünner Lage bedeckende Substanz zusammengehalten und am Kopf befestigt. Ein weiteres Verbindungs-

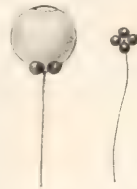


Fig. 68. Vorderes Ende eines Spermiums eines polychäten Borstenwurmes, Nephthys spec. Nach G. Retzius, Biol. Unters., N. F., Bd. XI, 1904, Tafel I, Fig. 1. Um ½ verkleinert.

Fig. 69. Ebenso, isolierte Geißel mit den vier Körnern des Nebenkernapparates. Nach G. Retzius, ibidem, Fig. 4. Um ½ verkleinert.

stück fehlt hier, ebenso wie bei den Lamellibranchiaten. Auch die Figuren 70, a bis d demonstrieren diesen Körnerkranz in der Ansicht von hinten von einem anderen Borstenwurm, Potamocerus triqueter L., den Verfasser vor Jahren auf Helgoland untersuchte. Auch der Verfasser fand hier



Fig. 70. Der isolierte Nebenkernapparat eines polychäten Borstenwurmes, Pomatocerus triqueter L., von hinten gesehen. a die vier ungleich großen runden Körner, in b miteinander verbacken, in c und d 3 resp. 5 Körner (selten). Nach E. Ballowitz (noch nicht publizierte Beobachtungen des Verfassers).

regelmäßig vier mit Gentianaviolett intensiv färbbare Körner, die aber ungleich groß waren; je zwei einander gegenüberliegende waren kleiner. Einmal fanden sich nur drei, ein anderes Mal fünf Körner, wie auch Retzius von anderen Polychäten berichtet. Bisweilen erschienen die vier Körner miteinander verschmolzen (Fig. 70b). Auch bei Potamocerus besitzt die Geißel ein Endstück.

Bei den Oligochäten ist der Kopf langgestreckt und zeigt bei Lumbricus noch weitere Differenzierungen (Fig. 71), sowie eine fibrilläre Struktur der Geißel. Bei den Hirudineen scheint nach W. Voigt eine Spiralform des Kopfes verbreitet zu sein.

Unter den niederen Würmern sind wieder die Spermien der Strudelwürmer (Turbellarien) sehr eigenartig gebaut und bei den einzelnen Gattungen merkwürdig verschieden. Die auffälligste Form besitzen die dendrocölen Turbellarien, deren Spermien aus drei isolierten, dimorphen, an einem Ende miteinander verbundenen Fasern bestehen. Zwei davon sind bei derselben Turbellarienart stets gleich lang, differieren in ihrer Länge

aber bei den einzelnen Species. Sie bewegen sich und stellen isolierte Geißeln dar, welche in der Nähe des einen Endes der dritten Faser angeheftet sind (Fig. 72); diese letztere ist etwas dicker und gewöhnlich auch länger als die beiden Geißeln. Ballowitz hat nachgewiesen, daß die beiden Geißeln sich aus zahlreichen feinen Fibrillen zusammensetzen. Aber auch die dritte Faser zeigt außer anderen Strukturen einen fibrillären Aufbau. Auch hier ist erst in letzter Zeit Koltzoff und G. Retzius durch Anwendung der oben schon erwähnten Biondischen Färbung der Nachweis ge-

Fig. 71. Spermium des Regenwurmes (Lumbricus terrester L.). Sst Spitzenstück des Kopfes, p intensiv färbbares Körnchen an der Grenze zwischen Spitzenstück und Hauptstück des Kopfes, V Verbindungsstück der Geißel. Am hintersten Geißelende ist der Achsenfaden in drei Fädchen zerfallen.

Fig. 72. Intaktes Spermium aus dem Vas deferens eines Strudelwurmes (Dendrocoelum punctatum Pallas). Nach E. Ballowitz „Ueber den feineren Bau der eigenartigen, aus drei freien, dimorphen Fasern bestehenden Spermien der Turbellarien". Archiv für mikroskopische Anatomie, Bd. 71, 1907, Tafel II, Fig. 1d.

lungen, daß in der dicken Hauptfaser das Kernderivat steckt, da sie zum Teil Chromatintinktion annimmt.

In den übrigen Ordnungen der Plattwürmer (Trematoden und Cestoden) wurden bis jetzt nur lange, einfache Fadenspermien gefunden, bei denen in reifem Zustande nach G. Retzius eine Einteilung in Kopf und Schwanz aber nicht möglich ist.

Die Fadenspermien der Echinodermen, welche mit Rücksicht auf die bei diesen Tieren oft ausgeführte künstliche Befruchtung ein besonderes Interesse bieten, sind sehr einfach gebaut und auch nur klein. Bei den Seeigeln, den Echiniden, ist der Kopf mehr konisch und besitzt ein ganz kurzes, knopfförmiges Perforatorium. Bei den übrigen Ordnungen ist der Kopf mehr kugelig mit breitem, plattem Spitzenstück, welches, wie Ballowitz zuerst abgebildet hat, napf- bis ringförmig ist, bei manchen Arten noch einen hinteren kugelförmigen Aufsatz trägt und sich vorn in die Substanz des Kopfes tief einlagert. Wie von G. Retzius beschrieben ist, erkennt man bei starker Vergrößerung in dem flachen Verbindungsstück, welches dem Kopf kelchartig anlagert, einige, meist undeutlich voneinander abgegrenzte Körner. Ballowitz hat an der Geißel eine fibrilläre Struktur, an ihrem vorderen Ende ein Endknöpfchen (Zentralkörper) und an ihrem hinteren Ende ein deutlich abgegrenztes Endstück aufgefunden.

4. Die Anematospermien der Wirbellosen. Im Gegensatz zu den Fadenspermien sind die geißellosen Samenkörper, Anematospermien, von Waldeyer als Kugelspermien, Sphärospermien, bezeichnet, nur auf wenige Tiergruppen beschränkt; sie kommen vor unter den Arthropoden bei manchen niederen Krebsen (Cladoceren; Copepoden), bei den Dekapoden und bei den Milben sowie unter den Würmern bei den Nematoden.

Diese Spermienart wird charakterisiert durch das Fehlen einer schwingenden Geißel; im übrigen sind ihre Form und Struktur sehr verschieden. Die einfachsten geißellosen Spermien führen die niederen Krebse und die Milben; die Spermien haben hier mehr den Charakter einer einfachen, kernhaltigen Zelle bewahrt. Diese Spermazellen können kugelig bis oval sein, oder sich, wie bei den Milben, etwas in die Länge strecken. Auch bei den Nematoden ist ihre Gestalt noch einfach, meist kegelförmig, wie z. B. bei Ascaris.

Figur 73 stellt den Samenkörper von Gordius aquaticus L. dar, welcher Wurm



Fig. 73. Spermium von Gordius aquaticus L. Nach G. Retzius, Biologische Untersuchungen, N. F., Bd. XV, 1910, Tafel XVII, Fig. 33. Um $^1/_3$ verkleinert.

gewöhnlich den Nematoden zugerechnet wird. Das zapfenförmige Gebilde besteht aus einem oberen schmalen und unteren breiten Teil und birgt in seinem Innern einen stiftförmigen Körper, welcher aber oft nicht in den unteren Teil hineinreicht. Wie G. Retzius die Tinktion mit Biondischer Farbmischung ergab, entspricht nur der

obere, den Binnenkörper umgebende Teil dem Kern.

Einen besonderen Reichtum an Formen und oft auch eine kompliziertere Struktur weisen die Anematospermien der Dekapoden auf, welche in neuerer Zeit von Koltzoff, Grobben und G. Retzius bei zahlreichen Gattungen eingehender studiert worden sind. Die Figuren 74 bis 78 illustrieren einige Typen dieser Dekapodenspermien. In ihnen findet sich ein bald kugeliger, bald mehr halbkugeliger oder auch unregelmäßig gestalteter Kopf, ferner eine eigenartige, verschieden gestaltete Schwanzkapsel mit einer Röhre, in welcher letzteren vor allem der Zentralkörperapparat enthalten ist. Dazu kommt dann noch bei den meisten ein mehr oder weniger ausgeprägtes, verschieden großes Nebenkernorgan, welches aus Körnern oder noch öfter aus einer Scheibe oder einem Ring besteht, der frei vorragende Aeste von wechselnder Zahl (Halsfortsätze Koltzoffs) entsenden kann (Fig. 74). Mehr oder weniger zahlreiche Fortsätze können aber auch direkt aus dem Kopf (Kern) entspringen (Kopffortsätze Koltzoffs), wie es unter den Makruren bei Astacus (Fig. 75) und bei den meisten Brachyuren (Fig. 76) der Fall ist. Figur 74 zeigt den schräg von der Seite gesehenen Samenkörper des makruren Dekapoden Nephrops norvegicus L. Nach oben (vorn) liegt der rundliche Kopf, an dessen Hinterfläche drei lange, dünne, biegsame, frei vorragende Seitenfortsätze mit ihren gespaltenen Wurzeln ringförmig zusammenfließen und hier befestigt sind. In der Mitte des Ringes inseriert der dritte, äußerlich abgrenzbare Bestandteil, die lange, schmale, zylindrische, eigentümliche Schwanzkapsel. Diese umschließt in ihrem Innern eine Röhre, welche sich am hinteren Ende der Schwanzkapsel öffnet; hier wird sie umgeben von einem quergestellten Doppelring, welcher

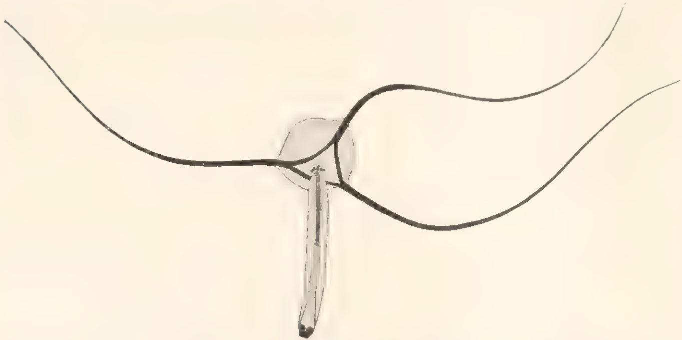


Fig. 74. Spermium von Nephrops norvegicus L. Schräg von der Seite gesehen. Nach G. Retzius, Biologische Untersuchungen, N. F., Bd. XIV, 1909, Tafel XII, Fig. 1. Um ½ verkleinert.



Fig. 76. Spermium von Stenorhynchus rostratus L. Von der hinteren Fläche gesehen. Nach G. Retzius, Biologische Untersuchungen, N. F., Bd. XIV, 1909, Tafel XVII, Fig. 24. Um ½ verkleinert.

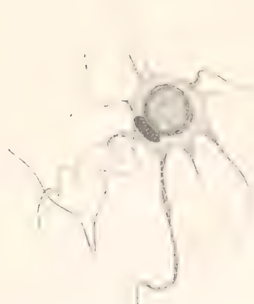


Fig. 75. Spermium des Flußkrebses (Astacus fluviatilis Rond.). Von der hinteren Fläche gesehen. Nach G. Retzius, Biologische Untersuchungen, N. F., Bd. XIV, 1909, Tafel XIV, Fig. 5. Um ½ verkleinert.

im optischen Durchschnitt in Form von zwei Paaren rundlicher Körner erscheint (Fig. 74). Das vordere Ende der Röhre ist von einem färbbaren, stabförmigen Körper ausgefüllt und stößt an eine an der Hinterfläche des Kopfes gelegene Körnergruppe. Retzius hält die letztere mit dem stabförmigen Körper für den Zentralkörperapparat. Sehr merkwürdig ist, daß die Schwanzkapsel sich umstülpen kann, wobei der Doppelring an der Außenfläche der Kapsel nach vorn rutscht, und der Zentralkörperapparat, insbesondere der stabförmige Körper, ausgestülpt wird. Die Beobachter sind aber nicht einig darüber, ob dieser Vorgang ein normaler ist oder durch abnorme Quellung in den Reagentien künstlich hervorgerufen wird. Große Aehnlichkeit mit den Nephropsspermien haben diejenigen des Hummers, nur ist der Zentralkörperapparat hier nicht so deutlich.

Hiervon sehr verschieden sind die Samenkörper des nahe verwandten Flußkrebses (Fig. 75), sie gleichen in mancher Beziehung denen der brachyuren Dekapoden. In Figur 75 blickt man auf die hintere Fläche dieser abgeplatteten, eigenartigen Gebilde. Der stark lichtbrechende, kreisrunde Ring in der Mitte des Körpers ist die auch mit einer inneren Röhre versehene, hier nur kurze Schwanzkapsel, welche von vorn her tief in den Kopf (Kern) des Spermiums eingesenkt ist. Der letztere, der Kopf (Kern), ist die ganze Masse, welche die ringförmige Schwanzkapsel in Figur 75 rings umgibt und eine wechselnde Zahl von langen, frei vorragenden, biegsamen Fortsätzen entsendet, die dem platten Gebilde ein „sternförmiges" Aussehen verleihen. G. Retzius fand an der vorderen Fläche des Kopfes noch einen tingiblen Körper auf (in Figur 75 links unten), den er für das Nebenkernorgan hält. Das letztere gibt also bei Astacus nicht den Fortsätzen den Ursprung, sondern vielmehr die Kopfsubstanz selbst, wie es sonst bei den Brachyuren der Fall ist. Figur 76 zeigt ein von der hinteren Fläche gesehenes Spermium des brachyuren Krebses Stenorhynchus mit fünf von der Kopfsubstanz ausgehenden, unbeweglichen Fortsätzen; die letzteren können auch bei manchen Brachyuren ganz fehlen, wie z. B. bei Eurynome in Figur 77. Der dunkle



Fig. 77. Spermium von Eurynome aspera Penn. Von der Fläche gesehen. Nach G. Retzius, Biologische Untersuchungen, N. F., Bd. XIV, 1909, Tafel XVII, Fig. 20. Um ½ verkleinert.

Ring im Innern dieser beiden Spermien ist wieder die kurze Schwanzkapsel. Figur 78 führt von der Krabbe Palaemon squilla schließlich noch den „Nageltypus" vor, welcher für die Spermien der Macrura natantia (Palaemon, Crangon) charakteristisch ist; der helle, vordere (obere) Teil der Nagelplatte entspricht dem Kopf (Kern) dieses Samenkörpers.



Fig. 78. Spermium von Palaemon squilla L. „Nagelform". Nach G. Retzius, Biologische Untersuchungen, N. F., Bd. XIV, 1909, Tafel XI, Fig. 1. Um ½ verkleinert.

5. Spermiogenese, Spermatogenese, Samenbildung. Der in den vorigen Abschnitten gegebene Ueberblick über die ausgereiften Spermien der Tiere hat eine außerordentliche Verschiedenheit dieser Gebilde dargetan. Nicht allein die Größe, die Form und die innere Struktur sind je nach den Gattungen sehr verschieden, es können sogar wichtige, für die Befruchtung für wesentlich gehaltene Bestandteile vermißt werden oder wenigstens zurzeit noch nicht nachweisbar sein, wie z. B. der Zentralkörperapparat, ja bisweilen sogar das Chromatin des Kernes (Kopfes).

Aus dieser überaus großen Verschiedenheit folgt schon, daß auch die Entstehung der Spermien, die Spermiogenese oder Spermatogenese, bei den Tieren sehr different sein muß. Berücksichtigt man, daß es sich hierbei oft um winzige, nur bei stärkster Vergrößerung wahrnehmbare Bildungen handelt, so leuchtet ein, daß das Studium der Spermiogenese sehr schwierig ist. So erklären sich auch die vielen, oft weitgehenden Meinungsverschiedenheiten der Forscher, welche sich mit diesen subtilen Untersuchungen beschäftigt haben.

Bei diesem Stand der spermiogenetischen Forschung empfiehlt es sich, hier nur die neueren, mit der vervollkommneten modernen Technik ausgeführten Untersuchungen zu berücksichtigen und aus einigen dieser, besonders die höheren Tierformen behandelnden Arbeiten die allgemeiner anerkannten Tatsachen hervorzuheben.

Den folgenden Ausführungen sind in erster Linie die Arbeiten von Waldeyer, v. Lenhossék, Meves, Duesberg u. a. zugrunde gelegt. Als erläuternde Beispiele der Spermiogenese mögen die Bildungsvorgänge im Hoden des Menschen und der Säugetiere dienen.

Die Samenkörper werden nur in den gewundenen Samenkanälchen, den Tubuli contorti des Hodens, erzeugt. Diese Abschnitte besitzen in ihrem Innern einen mehrschichtigen Zellenbelag, in welchem sich schon beim Neugeborenen zwei Arten von Zellen vorfinden, die auch nach Beginn der Samenbildung bei Eintritt der Geschlechts-

reife an ihren charakteristischen Unterschieden erkannt werden können, das sind die Fußzellen und die Samenzellen. Die ersteren, auch als Sertolische Zellen, „Follikel“-, „Stütz“- oder „Nährzellen“ bezeichnet, nehmen an der Samenbildung keinen aktiven Anteil und stellen umgewandelte Hodenepithelzellen dar, welche stationär bleiben und auch bei der Samenbildung nur wenig verändert werden. Welche Rolle sie als Nährzellen für die Ausbildung der Samenkörper spielen, werden wir später sehen.

Die andere Zellenart wird von den großen, kugeligen Ursamenzellen gebildet. Diese teilen sich nach Beginn der Pubertät reichlich und liefern ausschließlich die Spermien.

Bei der Spermiogenese sind nun an diesen Rundzellen zweierlei Vorgänge zu unterscheiden: a) die Entstehung der Spermatiden, d. h. der Vorstufen der Spermien aus den Ursamenzellen und b) die Umwandlung der Spermatiden in Spermien. Beide Vorgänge müssen gesondert betrachtet werden.

5a) Die Entstehung der Spermatiden aus den Ursamenzellen. Die Ausgangsformen der samenbildenden Zellen sind die Ursamenzellen (Waldeyer) oder Stammzellen (Biondi-Benda), welche Waldeyer als direkte Abkömmlinge der im Keimepithel der Hodenanlage befindlichen „Archispermiocyten“ ansieht. Die Ursamenzellen sind ziemlich große Elemente mit rundlichem oder ellipsoidem Kern und deutlichem Kernkörperchen; der Kern wird, abgesehen von einer ausgeprägten Chromatinhülle, durch eine sehr feine, staubförmige Verteilung von Chromatinpartikelchen charakterisiert („spermatogonies à noyaux poussiéreux“ Regauds; Fig. 79). Diese Ursamenzellen liegen stets der Wand der



Fig. 79. Nach Duesberg, „La spermatogénèse chez le rat“. Archiv für Zellforschung, Bd. I. Tafel X, Fig. 1.

Samenkanälchen dicht an. Durch ihre mitotischen Teilungen wird ein Material von Zellen geliefert, von denen ein Teil die Form und Lage der Ursamenzellen beibehält, während der andere Teil sich verändert und zu den Samenzellen der ersten Generation, den „Spermatogonien“ (v. la Valette St. George), wird.

Die Spermatogonien sind kleiner als die Ursamenzellen und besitzen ein helleres Protoplasma. Vor allem aber unterscheiden sie sich dadurch, daß sich die Chromatinbröckel an der Kernoberfläche ansammeln und dieser ein krustenartiges Aussehen verleihen (F. Hermanns „Spermatogonien mit Krustenkern“; Fig. 80).

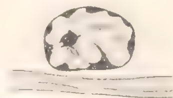


Fig. 80. Nach Duesberg, „La spermatogénèse chez le rat“. Archiv für Zellforschung, Bd. I. Tafel X, Fig. 2.

Die Spermatogonien vermehren sich nun durch zahlreiche, aufeinanderfolgende mitotische Teilungen, bis schließlich eine letzte Generation von Tochterzellen entsteht, welche nicht mehr Spermatogonien liefert, sondern sich zu anders gestalteten Rundzellen, der zweiten Generation der Samenzellen, den „Spermatocyten“ (v. la Valette St. George), umwandelt. Man unterscheidet Spermatocyten erster und zweiter Ordnung, die letzteren werden auch als Präspermatiden (Waldeyer) bezeichnet.

Die Spermatocyten erster Ordnung (Fig. 81) nehmen an Größe zu und machen vor

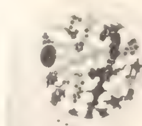


Fig. 81. Nach Duesberg, „La spermatogénèse chez le rat“. Archiv für Zellforschung, Bd. I, Tafel X, Fig. 11.

ihrer Teilung verschiedene Veränderungen ihres Kernes durch. Die eigentümlichste, gleich zu Anfang auftretende Veränderung des Kerns besteht darin, daß sich der größte Teil des Chromatins an derjenigen Kernseite zusammenlagert, an welcher sich das Idiozom (s. unten) befindet, eine Erscheinung, welche von Moore als „Synapsis“ bezeichnet worden ist. Duesberg und andere konnten allerdings diese „Synapsis“ nicht beobachten. Schließlich lassen sie durch mitotische Teilung die Spermatocyten zweiter Ordnung oder Präspermatiden aus sich entstehen. Diese Teilung wird als erste Reifeteilung bezeichnet. Nach einem Ruhestadium tritt dann die mitotische Teilung der Präspermatiden ein, die zweite Reifeteilung und die letzte Teilung der Samenbildungszellen überhaupt. Hieraus gehen die Spermatiden hervor, welche sich nunmehr direkt in die Spermien umwandeln. Während der Reifeteilung erfolgt eine Reduktion der Chromosomenzahl auf die Hälfte.

Die Spermatocyte erster Ordnung liefert demnach zwei Spermatocyten zweiter Ord-

nung oder Präspermatiden und jede von diesen wieder zwei Spermatiden, so daß demnach aus jeder Spermatocyte erster Ordnung vier Samenzellen (Spermatiden resp. Spermien) hervorgehen. Diese Spermatocytenteilungen entsprechen den Richtungsteilungen der Eizelle (vgl. den Artikel „Ei und Eibildung").

Die erste Reifeteilung vollzieht sich in der Form der heterotypischen Mitose (Flemming), die zweite Reifeteilung in der Form der homöotypischen Mitose (Flemming).

Neuerdings ist durch zahlreiche Untersuchungen besonders bei Wirbellosen (Insekten) nachgewiesen worden, daß bei der Reifeteilung Heterochromosomen, d. h. unpaare, anders gestaltete, akzessorische Chromosomen entstehen. Hierdurch werden zweierlei, nach Zahl und Art der Chromosomen unterschiedene Spermien gebildet, welche zur Geschlechtsdifferenzierung bei der Befruchtung in Beziehung gebracht werden (vgl. den Artikel „Fortpflanzung").

5b) Die Umwandlung der Spermatiden in Spermien, Histogenese des Spermiums. Die junge Spermatide (Fig. 82) stellt unmittelbar nach der zweiten Reifeteilung zunächst eine Rundzelle dar, deren Protoplasma die folgenden Teile enthält: 1. den Kern, 2. Zentralkörper oder Zentriolen, 3. das Idiozom, 4. Mitochondrien, 5. chromatoide Nebenkörper, 6. Spindelrestkörper; 5 und 6 sind nicht konstant.

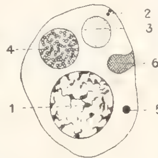


Fig. 82. Bestandteile der jungen Spermatide. 1 Kern, 2 Zentralkörper oder Zentriolen, 3 Idiozom, 4 Mitochondrienkörper (Nebenkern), 5 Chromatoider Nebenkörper, 6 Spindelrestkörper. Nach Meves, „Struktur und Histogenese der Samenkörper". Ergebnisse der Anatomie und Entwickelungsgeschichte Bd. XI, 1902, S. 458, Fig. 9.

Der Kern ist anfangs rund und besitzt eine bei den Tieren verschiedene Anordnung des Chromatingerüstes. Von ihm wurde zuerst bekannt, daß er sich in den Kopf des Spermiums umwandelt. Es ist sichergestellt, daß der chromatinhaltige Teil des Kopfes bei allen Tieren aus dem Kern hervorgeht. Die Umwandlung geschieht in der Weise, daß der Kern sich in die Länge streckt und gewöhnlich an dem einen Zellpol aus dem Zellkörper hervortritt. Dabei verschwindet das Chromatingerüst, indem das Chromatin sich zu einer kompakten Masse verdichtet.

Die Zentralkörperchen oder Zentriolen sind fast stets doppelt und befinden sich an einer Stelle der Spermatide dicht unter der Zelloberfläche. Sie sind dabei fast immer so angeordnet, daß ihre Verbindungslinie senkrecht zur Zelloberfläche steht. Meves unterscheidet daher einen dem Kern näher gelegenen, proximalen und einen distalen Zentralkörper. Die Zentralkörper liefern die tingiblen Körnchen, welche sich an dem vorderen („Endknöpfchen") und am hinteren Ende des Halsstückes vorfinden, sowie auch die „Schlußscheibe" des Verbindungsstückes. Die vorderen können in mehrere nebeneinander liegende Körnchen zerfallen, wie schon bei der Beschreibung der ausgebildeten Säugerspermien hervorgehoben wurde. Außerdem wächst schon früh aus dem distalen Zentralkörperchen der Achsenfaden hervor. Das proximale Zentralkörperchen tritt erst sekundär mit dem hinteren Kernpol in Verbindung.

Das Idiozom (Meves), auch wohl als Archiplasma oder Sphäre bezeichnet, stellt einen rundlichen Klumpen einer schwer färbbaren Substanz dar, welcher schon in den Spermatogonien und in den Spermatocyten erster Ordnung vorkommt und hier die Zentralkörper als Hülle umgibt (Fig. 81). Während der Metakinese einer jeden Teilung verschwindet das Idiozom und erscheint erst nach der Rekonstruktion des Kernes wieder. In den Spermatiden (Fig. 82) bildet diese Masse meist einen Körper für sich und liegt in der Regel zwischen dem Zentralkörper und dem Kern. Aus dem Idiozom geht das Perforatorium resp. die ganze Kopfkappe hervor.

Neuerdings hat Perroncito an den Spermatocyten einen durch besondere Methode darstellbaren Netzapparat, gleich dem von Golgi und seinen Schülern in anderen Zellen aufgefundenen, beschrieben; er wird aus Fäden gebildet, welche miteinander in Zusammenhang stehen, und entspricht seiner Lage nach derjenigen des Idiozoms. Ob diese Netzstruktur sich am Aufbau des Spermiums beteiligt, ist noch nicht sichergestellt.

Die Mitochondrien (Benda) sind kleinste, spezifisch färbbare Körnchen, welche die Neigung haben, sich zu Fäden aneinander zu lagern (*μίτος* Faden, *χονδρίον* Korn). Sie wurden schon 1884 von A. v. Brunn beschrieben, welcher Autor feststellte, daß sie das Material zu der im Verbindungsstück befindlichen Spirale liefern; indessen sind die v. Brunnschen Körner größer, als die Mitochondrien nach Färbung in den Schnittpräparaten erscheinen. In den Spermatiden von Wirbellosen sind die Körnchen, wie Meves fand, zu einem einzigen rundlichen Körper vereinigt, welcher mit dem schon von Bütschli und v. la Valette-St. George gesehenen „Nebenkern" identisch ist.

Nicht konstant ist der sogenannte chro-

matoide Nebenkörper, der sich ebenso intensiv färbt wie das Kernkörperchen und deswegen von manchen Autoren für Nukleolensubstanz gehalten wird, die bei den Spermatocytenteilungen aus dem Kern ausgestoßen wurde. Für die Histogenese des Spermiums ist er wahrscheinlich ebenso bedeutungslos, wie der Spindelrestkörper, welcher früher vielfach mit dem „Nebenkern" verwechselt worden ist. Der chromatoide Körper zerfällt alsbald in Stücke, die sich im Protoplasma auflösen.

Außer diesen Bestandteilen der Spermatide treten bei der Ausbildung des Spermiums noch vorübergehende Bildungen auf, wie die Schwanzmanschette und das Akrosom.

Was nun die charakterisierten Umwandlungsprozesse im einzelnen betrifft, so lassen sich in der Histogenese des Spermiums des Menschen und der Säugetiere nach Meves drei Perioden unterscheiden. Die erste Periode reicht vom Ende der letzten Reifungsteilung bis zum Auftreten der Schwanzmanschette („Schwanzkappe"), die zweite bis zum beginnenden Schwund dieses Gebildes und die dritte bis zur Abschnürung des größten, zum Aufbau des Spermiums nicht verwendeten Teiles der Zellsubstanz der Spermatide. Bei solchen Tieren, bei welchen die Ausbildung der Schwanzmanschette nicht mit genügender Deutlichkeit verfolgt werden kann, schlägt Meves vor, die Anlagerung der Zentralkörper an den Kern und den Beginn der Wanderung des Zentralkörperringes entlang dem Achsenfaden für die Einteilung zu verwenden.

In der ersten Periode wandelt sich zunächst das Idiozom um (Fig. 83 bis 86), indem in seinem Innern ein großes färbbares „Akrosom" (v. Lenhossék) entsteht. Dieses liegt innerhalb eines großen Bläschens (Fig. 83 und 84), welchem ein halbmondförmiger Rest von Idiozomsubstanz anliegt. Bläschen und Akrosom lagern sich nun dem Kern an (Fig. 85). Gleichzeitig beginnt das Akrosom sich in eine Außenzone und in ein Innenkorn zu differenzieren. Das Innenkorn tritt dann teilweise durch die Außenzone heraus und verschmilzt mit der Kernwand (Fig. 85 und 86). Das den Spitzenkörper umgebende Bläschen wird zur Kopfkappe. Der Rest des Idiozoms gleitet nach hinten und geht später zugrunde (Fig. 86).

Gleichzeitig verändern sich die direkt unter der Zelloberfläche gelegenen Zentralkörper (Fig. 87a bis d). Von dem distalen Zentralkörper wächst die Anlage des Achsenfadens der Geißel als feiner, immer länger werdender Faden aus (Fig. 87a). Für die menschlichen Spermatiden wies Meves nach, daß der proximale Zentralkörper an den Kern heranrückt, sich dem Kern anlagert und senkrecht zum Achsenfaden zu einem Stäbchen in die Länge wächst (Fig. 87 b bis d). Dieses Stäbchen verbindet sich zuerst

Fig. 83.

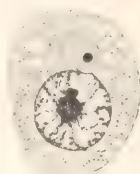


Fig. 84.

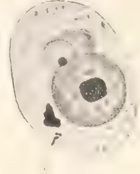




Fig. 85.



Fig. 86.

Fig. 83 bis 86. Umbildung des Idiozoms zur Kopfkappe. Nach Meves „Ueber Struktur und Histogenese der Samenfäden des Meerschweinchens". Archiv für mikroskopische Anatomie, Bd. 54, 1899, Tafel XIX, Fig. 9 bis 11 und 16.

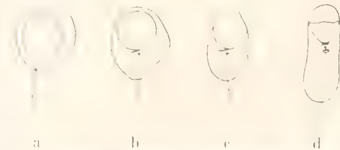


Fig. 87. a bis d. Umwandlung der beiden Zentralkörper der Spermatide. Nach Meves „Struktur und Histogenese der Spermien". Bd. XI, 1902. S. 482, Fig. 15.

nur durch sein eines, in der Verlängerung des Achsenfadens liegendes Ende, später in größerer Ausdehnung mit dem Kern.

Das distale, mit dem auswachsenden Achsenfaden versehene Zentralkörperchen rückt gleichfalls gegen den Kern und verdickt sich zu einem stumpfkegelförmigen Gebilde (Fig. 87 b und c), dessen Spitze dem

benachbarten, proximalen Zentralkörper zugewandt ist und sich mit ihm verbindet. Später findet man an seiner Stelle ein Knöpfchen und dahinter einen Ring (Fig. 87d), welche beide aus dem Kegel, wohl durch Zerschnürung, hervorgegangen sind. Der Achsenfaden steht durch die Oeffnung des Ringes hindurch mit dem abgetrennten Knöpfchen in Verbindung. Die letzteren Vorgänge spielen schon in die zweite Periode hinein.

Der in den Spermienkopf sich umbildende Kern (Fig. 87 a bis d) nimmt dabei eine exzentrische Lage ein, beginnt sich abzuplatten und in die Länge zu strecken und tritt aus der Zelle heraus, soweit er von der Kopfkappe bedeckt wird. Zugleich wird er immer dichter und mehr homogen.

Zu Anfang der zweiten Periode bildet sich die Schwanzmanschette. Ihre erste Anlage (Fig. 88a) besteht aus einem System



Fig. 88, a und b. Bildung der Schwanzmanschette. Nach Meves „Ueber Struktur und Histogenese der Samenfaden des Meerschweinchens". Archiv für mikroskopische Anatomie, Bd. 54, 1899, Tafel XX, Fig. 21 und 28.

feiner Fäden, welche an der Oberfläche des Kernes im Kreis um den Ursprung des Achsenfadens herum entspringen und schräg nach hinten hin ziehen. Diese Fäden werden dicker und schließen sich zu einer zarten Membran zusammen, welche als dünnwandige, hinten offene Röhre den hinteren Teil des Kernes und das Anfangsstück des Schwanzfadens umgibt (Fig. 88b und bei schwacher Vergrößerung Fig. 89).

Die dritte Periode beginnt damit, daß die Schwanzmanschette bis auf einen oder mehrere Fäden zugrunde geht; auch der Idiozomrest schwindet jetzt.

Der aus dem distalen Zentralkörper hervorgegangene Ring wandert am Achsenfaden zentrifugal entlang und rückt bis an das hintere Ende des späteren Verbindungsstückes, um hier die Schlußscheibe zu bilden. Die v. Brunnschen Körnchen resp. Mitochondrien lagern sich nunmehr um den Achsenfaden im Bereich des Verbindungsstückes herum und verschmelzen miteinander



Fig. 89. Ausgebildete Schwanzmanschette einer Spermatide vom Schafbock. Schwächere Vergr. als in den vorhergehenden Figuren. Nach E. Ballowitz, Die Bedeutung der Valentinschen Querbänder am Spermatozoenkopfe der Säugetiere. Archiv für Anatomie und Physiologie, Anatomische Abteilung, 1891, Tafel XII, Fig. 29.

zu dem Spiralfaden, zwischen dessen Windungen eine Zwischensubstanz entsteht. Der Kopf (Kern) nimmt gegen Ende der dritten Periode die definitive Form an. Dieser Entwickelungsprozeß findet seinen Abschluß im Hoden dadurch, daß die Zellsubstanz sich vom Spermium in Gestalt eines sackartigen Ballens abschnürt.

Im Nebenhoden findet sodann noch eine Nachreifung statt, wobei die Spiralbildung undeutlich wird, soweit die v. Brunnschen Körnchen nicht, wie bei manchen Tieren (s. oben) mehr voneinander getrennt bleiben.

Bei der Umwandlung der Spermatiden tritt nun in den Samenkanälchen eine bestimmte Orientierung und regelmäßige Zusammenlagerung der Elemente ein. Während sich das Protoplasma, bevor es abgeschnürt wird, an der Geißel gegen die Lichtung des Kanälchens auszieht, drängt der langgestreckte Kern (Kopf) gegen dessen Wandung hin. Dabei lagern sich die Spermatiden zu Bündeln zusammen und dringen gegen den Zellkörper der oben erwähnten Fußzellen vor. Diese letzteren sind langgestreckte, mit breiter Basis der Wandung des Hodenkanälchens ansitzende Elemente, welche radiär bis gegen das Lumen des Samenkanälchens vorragen. Ihr großer, chromatinarmer, mit Kernkörperchen versehener Kern liegt in der Basis der Zelle, während ihr Protoplasma, besonders beim Menschen, sich durch Reichtum an Fettkörnchen auszeichnet. Die Köpfe der Spermatiden senken sich nun zu Bündeln vereinigt in das Protoplasma der zu Nährzellen gewordenen Fußzellen ein und werden von deren Protoplasma vollständig umhüllt. So entsteht das eigenartige Bild der bündelweisen Verteilung der Spermatiden, wie es ein Schnitt durch die Wand des Hodenkanälchens der Säugetiere auf diesem Stadium

zeigt (Fig. 90). Nach Ausbildung der Spermien löst sich alsdann der Zusammenhang mit den Fußzellen, so daß die Samenkörper frei in das Lumen des Kanälchens gelangen.

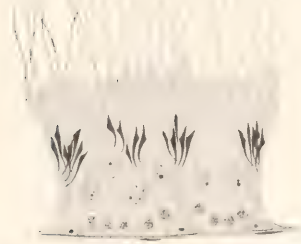


Fig. 90. Verbindung der Spermatiden mit den Fußzellen. Schnitt durch die Wandung der Samenkanälchen der Ratte. 3 Fußzellen mit Spermatiden. Nach von Lenhossék, Untersuchungen über Spermatogenese. Archiv für mikroskopische Anatomie, Bd. 51, 1898, Tafel XII, Fig. 4. Um die Hälfte verkleinert.

Längsschnitte durch die funktionierenden Samenkanälchen zeigen, daß die Ausbildung der Spermien wellenförmig vor sich geht, d. h. daß die einzelnen Phasen der Spermiogenese bis zur völligen Reifung hintereinander verlaufen. Auf einem Querschnitt durch ein Samenkanälchen trifft man daher in allen Abschnitten der Wandung stets nur die gleichen Umwandlungsstadien der Samenzellen an.

Aus Raummangel kann hier nicht die Spermiogenese der niederen Wirbeltiere und der Wirbellosen berücksichtigt werden. Es sei nur noch erwähnt, daß, soweit die neueren Untersuchungen zeigen, auch hier der Kopf, d. h. der chromatinhaltige Teil des Spermiums, aus dem Zellkern hervorgeht, die Sphäre das Spitzenstück liefert und die Zentralkörper in das Verbindungsstück übergehen und aus sich den Achsenfaden hervorsprossen lassen. In betreff der Literatur verweise ich auf die ausführlichen Literaturverzeichnisse bei Korschelt und Heider, Lehrbuch der vergleichenden Entwickelungsgeschichte Bd. I (bis 1902) und bei W. Waldeyer, Die Geschlechtszellen, in O. Hertwigs Handbuch der vergleichenden und experimentellen Entwickelungsgeschichte der Wirbeltiere Bd. I (bis 1902); das folgende Verzeichnis gibt eine Anzahl der wichtigsten neueren Arbeiten über die Spermatogenese der Wirbeltiere und Wirbellosen seit dem Jahre 1902.

Literatur. *Zu* 1 *bis* 4: **E. Ballowitz**, *Zur Lehre von der Struktur der Spermatozoen. Anat. Anz.,* *1886.* — **Derselbe**, *Spermatozoen der Vögel. Arch. f. mikroskop. Anatomie, Bd.* 32, *1888.* — **Derselbe**, *Spermatozoen der Insekten. Zeitschr. f. wissensch. Zool., Bd.* 50, *1890.* — **Derselbe**, *Spermatozoen der Fische, Amphibien und Reptilien, Arch. f. mikroskop. Anatomie, Bd.* 36, *1890.* — **Derselbe**, *Spermatozoen der Säugetiere. Zeitschr. f. wissensch. Zoologie, Bd.* 52, *1891.* — **Derselbe**, *Spermatozoen der Wirbellosen. Internat. Monatsschr. f. Anatomie und Physiol., Bd.* 11, *1894.* — **Derselbe**, *Die Doppelspermatozoen der Dytisciden. Zeitschr. f. wissensch. Zoologie, Bd.* 60, *1895.* — **Derselbe**, *Spermien von Discoglossus pictus. Arch. f. mikroskop. Anatomie, Bd.* 63, *1903.* — **Derselbe**, *Spermien von Petromyzon. Arch. f. mikroskop. Anatomie, Bd.* 65, *1904.* — **Derselbe**, *Spermien der Cetaceen. Arch. f. mikroskop. Anatomie, Bd.* 70, *1907.* — **Derselbe**, *Spermien der Turbellarien. Arch. f. mikroskop. Anatomie, Bd.* 71, *1907.* — **Derselbe**, *Spermien der frugivoren Chiropteren, Prosimier und von Chiromys madagascariensis. Anat. Anz., Bd.* 34, *1909.* — **Derselbe**, *Spermien des Erdferkels. Anat. Anz.,* 42. *Bd., 1912.* — **J. Bromann**, *Ueber atypische Spermien. Anat. Anz., Bd.* 21, *1902 und Anat. Hefte, Heft* 60, *1902.* — **Th. Eimer**, *Verhandl. der physikal.-mediz. Gesellsch. in Würzburg, N. F., Bd.* 6, *1874.* — **G. Gilson**, *Spermatogenese chez les arthropodes. La Cellule, t.* 1 *und* 2, *1886 bis 1887.* — **K. Grobben**, *Zur Kenntnis der Dekapodenspermien. Arb. d. Zool. Instituts in Wien, Bd.* 16, *1906.* — **G. Herrmann**, *Développement des spermatozoides chez les décapodes. Bullet. scientif. de la France et de la Belgique, 1890.* — **O. S. Jensen**, *Struktur der Samenfäden. Bergen 1879.* — **Derselbe**, *Samenkörper der Säugetiere, Vögel und Amphibien. Arch. f. mikroskop. Anatomie, Bd.* 30, *1887.* — **K. Koltzoff**, *Spermien der Dekapoden. Arch. f. mikroskop. Anatomie, Bd.* 67, *1906.* — **Derselbe**, *Kopfskelett des tierischen Spermiums. Arch. f. Zellforschung, Bd.* 2, *1908.* — **Korschelt und Heider**, *Lehrbuch der vergleichenden Entwickelungsgeschichte der wirbellosen Tiere. Allgem. Teil, erste Lieferung, 1. u. 2. Aufl., 1902, S. 397. Sperma und Spermatogenese.* — **C. Pictet**, *Recherches sur la spermatogénèse chez quelques Invertébrés de la Méditerranée. Mitt. d. Zool. Station Neapel, Bd.* 10, *1891.* — **G. Retzius**, *Zur Kenntnis der Spermatozoen. Biologische Untersuchungen 1881.* — **Derselbe**, *Spermien der Wirbeltiere und Wirbellosen. Biologische Untersuchungen, N. F., Bd.* 10, *1902 (Mensch, Säugetiere, Selachier); Bd.* 11, *1904, Evertebraten I; Bd.* 12, *1905, Evertebraten II, Leptocardier, Teleostier, Ganoiden; Bd.* 13, *1906, Vertebraten und Evertebraten; Bd.* 14, *1909. Desgl.; Bd.* 15, *1910, Echinodermen, anthropoide Affen; Bd.* 16, *1911, Mammalien und Vögel.* — **W. Waldeyer**, *Die Geschlechtszellen. In O. Hertwigs Handbuch der vergleichenden und experimentellen Entwickelungslehre der Wirbeltiere. Bd.* 1, *Teil I, Jena 1906 (Lieferung 1 erschien 1901).*

Zu 5: **Blackmann**, *Spermatogenesis of the Myriopoda. Biol. Bull., Vol.* 19, *1910.* — **A. Branca**, *Les mitoses spermatocytaires chez l'homme. Bibliogr. anat., T.* 21, *Fasc. 5, 1911.* — **Bromann**, *Ueber Bau und Entwickelung der*

Spermien von Rana fusca. Arch. f. mikrosk. Anat., Bd. 70, *1907.* — **P. Buchner**, *Das akzessorische Chromosom in Spermatogenese und Ovogenese der Orthopteren, zugleich ein Beitrag zur Kenntnis der Reduktion. Arch. f. Zellforsch., Bd.* 3, *1909.* — **Dingler**, *Ueber die Spermatogenese des Dicrocoelium lanceolatum Still et Hass. (Distomum lanceolatum). Arch. f. Zellforsch., Bd.* 4, *1910.* — **Downing**, *The Spermatogenesis of Hydra. Zool. Jahrb., Abt. Anat., Bd.* 21, *1905.* — **Duesberg**, *Nouvelles recherches sur l'appareil mitochondral des cellules séminales. Arch. f. Zellforsch., Bd.* 6, *1911.* — **Derselbe**, *Les divisions des spermatocytes chez le Rat. La spermatogénèse chez le Rat. Arch. f. Zellforsch.,* 1. *und* 2. *Bd.* — **Gerard**, *Recherches sur la spermatogénèse chez Stenobothrus biguttulus. Arch. Biol., T.* 24, *1909.* — **Goldschmidt**, *Kleine Beobachtungen und Ideen zur Zellenlehre. I. Akzessorisches Chromosom und Geschlechtsbestimmung. Arch. f. Zellforsch., Bd.* 6, *1911.* — **Gross**, *Die Spermatogenese von Pyrrhocoris apterus. Zool. Jahrb., Abt. Anatomie, Bd.* 23, *1907.* — **H. E. Jordan**, *The Spermatogenesis of the Opossum (Didelphys virginiana). Arch. f. Zellforsch., Bd.* 7, *1912.* — **Derselbe**, *The Spermatogenesis of the Opossum with special Reference of the accessory Chromosome and the Chondriosomes. Arch. f. Zellforsch., Bd.* 7, *1911.* — **Kleinert**, *Die Spermatogenese von Helix (Tachea) nemoralis et hortensis. Jenaische Zeitschr. f. Naturw., Bd.* 54, *1910.* — **E. Korschelt**, *Ueber Morphologie und Genese abweichend gestalteter Spermien. Verh. Deutsch. zool. Gesellschaft, 18. Versammlung. Marburg 1906.* — **Leplat**, *Le spermiogénèse chez le chat. Arch. biol., T.* 25, *1910.* — **Marcus**, *Ei- und Samenreife bei Ascaris canis (mystax). Arch. f. mikrosk. Anat., Bd.* 68, *1906.* — **Derselbe**, *Ueber die Beweglichkeit der Ascarisspermien. Biol. Centralbl., Bd.* 26, *1906.* — **Fr. Meves**, *Ueber oligopyrene und apyrene Spermien und über ihre Entstehung nach Beobachtungen an Paludina und Pygaera. Arch. f. mikr. Anat., Bd.* 61, *1902.* — **Derselbe**, *Struktur und Histogenese der Spermien. Ergebnisse der Anatomie und Entwickelungsgeschichte, Bd.* 10, *1901. Wiesbaden 1902.* — **Oettinger**, *Zur Kenntnis der Spermatogenese bei den Myriopoden. Arch. f. Zellforsch., Bd.* 3, *1909.* — **H. Otte**, *Samenbildung und Samenreifung bei Locusta viridissima. Zool. Jahrbuch, Abt. Anatomie u. Ontogenie, Bd.* 24, *1907.* — **Spitchakoff**, *Spermien und Spermiohistogenese bei Carida. Arch. f. Zellforsch., Bd.* 3, *1910.* — **Schmalz**, *Zur Kenntnis der Spermatogenese der Ostracoden. Arch. f. Zellforsch., Bd.* 8, *1912.* — **Wassilieff**, *Die Spermatogenese von Blatta germanica. Arch. f. mikr. Anat., Bd.* 70, *1907.* — **Wilke**, *Die Spermatogenese von Hydrometra lacustris. Jenaische Zeitschr. für Naturw., Bd.* 42, *1907.*

E. Ballowitz.

Sphärolithe.

1. Definition. 2. Struktur und Zusammensetzung. 3. Optisches Verhalten. 4. Entstehung. 5. Anhang: flüssige Kristalle.

1. Definition. Sphärolithe sind äußerlich kugelförmige, ellipsoidische bis unregelmäßig rundliche Körper von kristallinischer Beschaffenheit mit zentrisch-, seltener exzentrisch-radialfaseriger, manchmal auch konzentrischer Struktur.

Rosenbusch hat allerdings die Sphärolithe anders definiert, indem er diese von den Sphärokristallen unterschied. Die letzteren entsprechen etwa der obigen Definition, während er unter den ersteren tropfenförmige isotrope (Glas-) Massen verstand. die Spannungsdoppelbrechung zeigen und insofern optisch eine gewisse Analogie mit unseren eigentlichen Sphärolithen zeigen. Sie sind aber prinzipiell etwas anderes, werden besser ganz abgeschieden und bei der akzidentellen Doppelbrechung behandelt (vgl. den Artikel „Doppelbrechung"). Da außerdem der Ausdruck Sphärokristall nur verwirrend wirken kann, wie schon Cohen gezeigt hat, indem wir unter „Kristall" ein gesetzmäßiges (paralleles oder symmetrisches) Aggregat von Molekülen zu verstehen haben, so ist es zweckmäßig, die obengewählte Definition mit der Mehrzahl der Mineralogen beizubehalten und die Bezeichnung Sphärokristall für andere Bildungen, die wir nachher kurz erwähnen werden, zu reservieren.

Mit Annahme dieser exakten Definition scheiden auch andere Dinge aus, die Zirkel zu den Sphärolithen stellte, die damit offenbar aber nur eine gewisse Verwandtschaft oder Analogie zeigen. Nämlich: 1. Die Cumulite: kugelige oder brombeerförmige, auch ellipsoidische Aggregate körneliger Globulite (kleinste nahezu submikroskopische Kugelchen) ohne wahrnehmbare Radialstruktur. 2. Die Granosphärite: Zusammenballungen regelloser kristallinischer Körnchen zu kugeligen Aggregaten ohne Radialstruktur. Dagegen reihen sich den Sphärolithen ein: Zirkels Globosphärite, Belonosphärite und Felsosphärite, die sich nach Zusammensetzung und Kristallgröße voneinander unterscheiden. Die Cumulite sind vielleicht Vorläufer der Globosphärite wie diese von den Belonosphäriten und Felsosphäriten; die Granosphärite sind dem Kristallisationshof vergleichbare Bildungen.

2. Struktur und Zusammensetzung. Das Hauptcharakteristikum der Sphärolithe ist demnach die zentrisch- bis exzentrischradiale bis subradiale Anordnung faseriger kristalliner Bestandteile von beliebiger Dicke bis herab zu mikroskopischen und ultramikroskopischen Dimensionen. Weiterhin

dann dementsprechend kugelförmige, ellipsoidische oder ähnliche Gestalt mit glatter, stacheliger oder brombeerartiger Oberfläche. Aufgewachsene Sphärolithe können natürlich nur die eine Hälfte der Gestalt zeigen.

Die äußere Form ist bald kugelförmig, bald ellipsoidisch, bald semmelförmig oder manschettenknopfartig. Oefters sind mehrere zusammengewachsen und beeinflussen sich dadurch in ihrer äußeren Form. Die Größe ist sehr schwankend, bald von mikroskopischer Ausdehnung, bald auch Dezimeter im Durchmesser betragend.

Sie können mineralogisch homogen oder inhomogen sein und zwar in zweierlei Weise. Einerseits ist ein Bau aus zweierlei Kristallfasern möglich oder es können die Fasern in ein nicht faserig struiertes kristallines oder amorphes Medium (Kolloid) eingebettet sein. Andererseits kann eine konzentrische oder zonare Struktur hinzutreten, so daß der Sphärolith konzentrisch-schalig und radialfaserig zugleich ist. Bezüglich der chemischen Zusammensetzung der Sphärolithe ist zu erwähnen, daß man schon alle möglichen Substanzen organischer und anorganischer, natürlicher und künstlicher Art in dieser Strukturform kennen gelernt hat.

Die einzelnen Fasern sind nun zumeist nicht einfach, sondern nach außen hin unter kleinem Winkel eisblumenartig verzweigt, so daß man mit bloßem Auge schon oder auch mikroskopisch Sektorenteilung oder Speichenstruktur wahrnehmen kann, die dann leicht mit der brombeerartigen Oberfläche koinzidiert.

Im Innern der Sphärolithe ist nicht selten ein Kern oder ein Hohlraum vorhanden. Der Kern ist entweder fremdartig oder gehört der gleichen Substanz an, wie die Fasern. Der Hohlraum ist bald mit Flüssigkeiten, bald mit Gasen erfüllt. In beiden Fällen kann der Kern größeres Volumen haben als die Schale (Enhydros = Sphärolith mit Wassereinschluß, Lithophysen = Sphärolith mit Gaseinschlüssen).

3. **Optisches Verhalten.** Es wird von der Dicke der Fasern und von ihren Lichtbrechungsverhältnissen abhängen, ob man die Radialfaserigkeit schon mit bloßem Auge oder erst mit dem Mikroskop oder gar erst im polarisierten Lichte zwischen gekreuzten Nikols erkennt. Analog ist es mit dem Kern oder mit der konzentrisch-schaligen Struktur.

Das Verhalten im parallelen polarisierten Lichte zwischen gekreuzten Nikols ist ein etwas verschiedenes, je nachdem wir einen äquatorialen, einen randlichen Schnitt oder einen ganzen Sphärolith betrachten. Allen diesen drei Eventualitäten gemeinsam ist das Erscheinen eines dunklen Kreuzes, dessen Kreuzungspunkt bei zentrisch radialfaserigen Individuen in der Mitte des Gebildes liegt. Bei kugelförmigen Sphärolithen erscheint es in jeder Lage des Schnittes, bei ellipsoidischen, wenn die beiden Achsen des elliptischen Schnittes den Nikolhauptschnitten parallel gehen. Bei Sphärolithen, deren Fasern längs der Faserrichtung auslöschen, gehen die Kreuzbalken den Nikolhauptschnitten parallel, bei schief auslöschenden Fasern ist dies nicht der Fall. Der Grund für die Erscheinung des schwarzen Kreuzes ist leicht einzusehen, denn es müssen diejenigen Fasern dunkel oder nahezu dunkel erscheinen, deren Schwingungsrichtung mit den Nikolhauptschnitten ganz oder nahezu zusammenfällt. Dreht man nun einen kugelförmigen, regelmäßigen Sphärolith in der Beobachtungsebene, so kann das dunkle nach den Seiten verschwimmende Kreuz seinen Ort und seine Erscheinungsweise nicht ändern, wohl aber bei einem ellipsoidischen oder sonst unregelmäßigen Individuum. Bei elliptischer Form des Schnittes wird sich beim Drehen das Kreuz in der Mitte öffnen und es werden vier getrennte schwarze Balken entstehen, die sich je zu zweien rechtwinkelig treffen. Die entsprechenden optischen Erscheinungen an zwei zwillingsartig miteinander verwachsenen Sphärolithen lassen sich leicht ableiten. Mehr als vierarmige dunkele Kreuze kommen bei solchen Sphärolithen vor, an deren Aufbau neben gerade- auch schiefauslöschende Fasern teilnehmen. Während nun das schwarze Kreuz bei äquatorialen Schnitten die einzig bemerkbare optische Erscheinung ist, zeigen ganze Sphärolithe oder randliche Schnitte durch sie außerdem noch im homogenen Lichte schwarze und helle, im weißen Lichte farbige, durch Interferenz hervorgebrachte Ringe, die in ähnlicher Weise zustande kommen wie bei dem Achsenbild optisch-einachsiger Kristalle, aber hier an den Ort gebunden sind, in dem Bruchstücke eben auch nur einen Teil des Bildes zeigen, was bei den Kristallen nicht der Fall ist. Es bedarf auch hier nicht konvergenten, sondern nur parallelen Lichtes. Zur Beobachtung der Ringe in nicht äquatorialen Schnitten muß man das Objektiv des Mikroskops heben, wenn das Zentrum des Sphäroliths über der oberen Schnittfläche gelegen ist und umgekehrt. Mit den Unregelmäßigkeiten des schwarzen Kreuzes geht auch eine solche der Ringerscheinungen Hand in Hand.

Man kann bei solchen Gebilden natürlich auch den Charakter der Doppelbrechung mit Hilfe des Gipsblättchens von Rot I. Ordnung bestimmen und wird genau wie bei den Kristallen bei den Positiven das Graublau I. Ordnung in den beiden Quadranten in Blau II. Ordnung verwandelt finden, durch welche der größere Brechungsexponent

des Gipsplättchens geht und umgekehrt. Positiver Charakter der Doppelbrechung wird dann vorhanden sein, wenn der größere Brechungsexponent in der Längsrichtung der Fasern liegt.

Bei pleochroitischen Substanzen werden die abwechselnden Quadranten gleiche, die nebeneinanderliegenden verschiedene Farben zeigen, wenn man nur mit einem Nikol beobachtet.

4. Die Entstehung. Ueber die Entstehung der Sphärolithe gehen die Ansichten heute zwar noch auseinander, aber darin stimmen wohl die meisten überein, daß die Kristallisation sich sehr schnell vollzogen hat. Als beginnende Sphärolithbildung kann man beiderseits ausgefranste oder desminartig zerfaserte Kristalliten, lemniskatenartige, semmelförmige oder manschettenknopfähnliche Bildungen ansehen.

Man findet die Gebilde in Meteoriten (Chondren), wo sie meist exzentrisch-faserig sind und vermutlich entglaste Tropfen darstellen, deren Keim seitlich im Tropfen gelegen hat, dann in den Eruptivgesteinen, wo sie wie in den Meteoriten feurigflüssiger Entstehung sind, in Metamorphen (z. B. Serpentin- und Chloritsphärolithe), in Kalksteinen (Oolithe und Pisolithe), auf Gängen und in Höhlen (Glaskopfstrukturen, Stalaktiten), in Drusen und Mandeln (Chalcedon), bei vielen künstlich dargestellten Niederschlägen anorganischer und organischer Natur, in tierischen Panzern, Schalen und Skeletten.

Da man nun beobachtet hat, daß sowohl bei natürlicher als bei künstlicher Bildung von Sphärolithen der Kristallisation gewöhnlich oder wenigstens häufig eine Gelbildung vorausgeht, so hat man einen ursächlichen Zusammenhang zwischen den Gelen und der Sphärolithstruktur vermutet. Dies hat auch darin eine Stütze gefunden, daß man in vielen natürlichen Sphärolithen noch Gelsubstanzen hat nachweisen können, die einerseits anfangs als Schutzkolloide gedient haben und andererseits durch ihren Bau bedingend für die Sphärolithstruktur geworden sein können. So mag teils der innere Bau des Gels (Wabenbau), teils seine Nachgiebigkeit gegen die im wesentlichen tangential wirkende Oberflächenspannung die Ursache für die radiale Stellung der Fasern geworden sein. Die konzentrischen Strukturen verdanken ihre Entstehung entweder einem Wechsel in der chemischen Zusammensetzung der Mutterlauge oder einem Hiatus in der Bildung oder endlich einer Diffusion anders zusammengesetzter Substanzen von außen nach innen oder von innen nach außen. Beispiele für das erstere sind die manganreicheren und -ärmeren Lagen beim Glaskopf, für das zweite die Zonenstruktur der Stalaktiten und Pisolithe, für das letzte die Achate.

5. Anhang: Flüssige Kristalle. Ein Teil der flüssigen Kristalle erscheint als Kristalltropfen. Diese zeigen, ohne daß mit dem Mikroskop eine faserige Struktur sichtbar wäre, ganz analoge Erscheinungen wie die Sphärolithe. Alle zeigen nach Vorländer im polarisierten parallelen Licht zwischen gekreuzten Nikols das scheinbare Achsenbild einachsiger Kristalle von positivem Charakter der Doppelbrechung. Deformation des Tropfens bedingt eine Deformation des Interferenzbildes. Aufdrücken des Deckglases verwandelt die ganze Masse in einen scheinbar einachsigen Kristall mit senkrecht zum Deckglas liegender Hauptachse. Man könnte diese Erscheinungen meines Erachtens so klären, daß die nach Vorländer kettenartigen Moleküle in dem durch die Oberflächenspannung kugelförmigen Tropfen entsprechend der weit vorherrschenden tangentialen Druckkomponente der Oberflächenspannung sich alle radial stellen. Mit anderen Worten: Man hätte einen Sphärolith vor sich mit molekularen Dicken der einzelnen Fasern und erhielte damit die optischen Erscheinungen jener. Für diese Anschauung sprechen auch pleochroitische Tropfen (O. Lehmann), welche in gegenüberliegenden Quadranten gleich im benachbarten verschieden gefärbt sind. Solche Gebilde könnte man mit Recht als Sphärolithkristalle bezeichnen, um die Anordnung der Moleküle zu demonstrieren. Bringt man eine solche einheitliche Flüssigkeit zwischen planparallele Glasplatten und drückt, so ordnen sich die Moleküle alle mit ihrer Längsrichtung parallel der Glasplatte, sind dabei aber sonst beliebig orientiert und die Flüssigkeit muß das Achsenbild eines optisch einachsichen Kristalls geben wie eine entsprechende Glimmerkombination.

Literatur. ***F. Zirkel***, *Lehrbuch der Petrographie. II. Aufl., 1893*, **I**, *87 u. 471.* — ***H. Rosenbusch und E. A. Wülfing***, *Mikroskopische Physiographie der petrographisch wichtigen Mineralien. IV. Aufl., 1904*, $\mathbf{I}_1$, *395.* — ***R. Marc***, *Ueber die Bedeutung der Kolloidchemie für die Mineralogie. Fortschritte der Mineralogie 1913, III, 22.* — ***O. Mügge***, *Ueber einen Eisenkiesel von Suttrop bei Warstein in Westfalen. Zentralblatt f. Mineralogie usw. 1911, 196.* — ***D. Vorländer und H. Hauswaldt***, *Achsenbilder flüssiger Kristalle. Nova acta. Abh. d. K. Leop. Carol. Deutsch. Ak. der Naturforscher XC, 1909, 2.* — ***G. Linck***, *Grundriß der Kristallographie. III. Aufl., 1913, 2, 39, 144.*

G. Linck.

Spiegel.

Rutschflächen, Harnische.

So nennt man die ebenen, mit Schrammen versehenen, öfters mit Erzen überzogenen Trennungsflächen, längs deren die Verschiebung von Gebirgsmassen gegeneinander stattgefunden hat (vgl. den Artikel „Gebirgsbau“).

Spinnentiere.

Die Spinnentiere sind eine der Hauptgruppen der Gliedertiere, durch den Besitz von 4 Beinpaaren und nur 2 Paar Kopfanhängen (Cheliceren und Pedipalpen) ausgezeichnet, durch Lungen und Tracheen atmend, hauptsächlich auf dem Lande lebend (vgl. den Artikel „Arachnoiden“).

Spirochäta.

Spironemacea.

I. Allgemeiner Teil. 1. Definition. 2. Morphologie und Fortpflanzung. 3. Systematik. II. Spezieller Teil: Die wichtigsten pathogenen Formen.

I. Allgemeiner Teil.

1. Definition. Unter Spirochäten werden zurzeit häufig noch sehr kritiklos besondere korkzieherartig gewundene, stark flexible Mikroorganismen verstanden, deren Stellung im Protistenreich immer noch nicht einwandfrei erwiesen ist und daher noch lebhaft diskutiert wird. Seit der Entdeckung des Syphiliserregers durch Schaudinn ist eine Fülle von Arbeiten über diese Protistengruppe erschienen, die sich jedoch mehr mit den biologischen, als mit den morphologischen und systematischen Fragen beschäftigten. Erst in allerletzter Zeit sind besonders von zoologischer Seite aus ausführlichere Studien über den Bau und die Entwicklung gemacht worden, die in wichtigen Punkten mehr übereinstimmen, so über die Art der Fortpflanzung, über Plasma- und Chromatinbau u. dgl. Auch kann wohl heute kein Zweifel mehr über die Benennungsweise herrschen. Nur für eine kleine freilebende Gruppe ist der Name „Spirochaeta“ angebracht, während für die meisten anderen, zum Teil wegen ihrer Pathogenität sehr wichtigen Formen andere Gattungsnamen aufgestellt wurden, Spironema, Cristispira, Treponema. Alle diese Formen, die sich durch eine starke Flexibilität des Zellkörpers und durch eine spiralige, korkzieher- oder schlangenartig gewundene Form auszeichnen, werden jetzt zu einer besonderen Gruppe „Spironemacea“ zusammengefaßt.

Mit dem Namen Spirochaeta belegte zum erstenmal Ehrenberg eine in stehenden Gewässern freilebende Form, die er als besonderes flexibles Bacterium auffaßte, und welche später auch von Botanikern zu den Spirillaceen gestellt wurde. In der Folgezeit wurden allgemein auch die Erreger des Rückfallfiebers des Menschen und andere Spirochäten als Schraubenbakterien zu den Spirillen gestellt. Erst durch Schaudinn wurde eine neue Diskussion hervorgerufen, die dann zu einem eingehenden Studium sowohl der freilebenden, als auch der parasitisch lebenden Formen führte. Als Schaudinn den Syphiliserreger 1905 fand, war das Dunkelfeld noch nicht vorhanden, und das Spirochätenstudium war im allerersten Anfang. Schaudinn nannte den Erreger „Spirochaeta“, weil er verwandtschaftliche Beziehungen mit der freilebenden Spirochaeta plicatilis und mit einem aus dem Blute des Steinkauzes stammenden Flagellaten, Leukocytozoon (Spirochaeta) Ziemanni, annehmen zu müssen glaubte. Selbst später nach Korrektur der ersten Arbeiten über den Syphiliserreger — Schaudinn hielt nur noch an einer sehr fern gelegenen phylogenetischen Verwandtschaft mit den Flagellaten fest und akzeptierte die Bezeichnung „Treponema“ — blieb die falsche Bezeichnungsweise „Spirochaeta“, besonders in den medizinischen Kreisen bestehen.

Vor allem war man sich nicht klar, ob nun wirklich die Spironemaceen echte tierische Mikroorganismen, Protozoen, sind, oder ob sie als pflanzliche Organismen den Bakterien anzugliedern sind. Und bis jetzt stehen sich in diesen Fragen immer noch diese zwei gegensätzlichen Richtungen gegenüber, obwohl, wie gesagt, die oben erwähnten Gattungsnamen akzeptiert wurden. Erst volle Uebereinstimmung in den Auffassungen über die Morphologie kann hier richtige Klarheit schaffen.

2. Morphologie und Fortpflanzung. a) Spirochäta. Nach Ehrenberg und nach späteren von Bütschli und in neuester Zeit von Zuelzer angestellten Untersuchungen ist die Spirochäte, die in der freilebenden Spirochaeta plicatilis (Fig. 1a) ihren wichtigsten Vertreter hat, durch einen nackten Körper charakterisiert, an welchem auch keinerlei Organellen, wie Geißeln, wahrzunehmen sind. Besonders charakteristisch ist für die Spirochäte vor allem die starke Flexibilität des Zellkörpers in der Bewegung. Der ganze durchschnittlich 100 bis 200 μ lange und $^1/_2$ bis $^3/_4$ μ dicke plasmatische und spiralig gewundene Zellkörper wird von einem einheitlichen Achsenstab, der sich mit Zellkernfarbstoffen stark färbt, durchzogen. Das Protoplasma von alveolärem, großwabigem Bau erscheint nach den Rändern hin von

konsistenterer Natur und gibt auf diese Weise dem Zellkörper einen gewissen festen Halt. Außer dem Achsenstab liegen in den Plasmaspiralen gewisse mit Zellkernfarbstoffen sich gut tingierende Körnchen, die an und für sich nichts mit Chromatin, Zellkernsubstanz, zu tun haben, sondern, wie Zuelzer nachweisen konnte, Volutinkörner

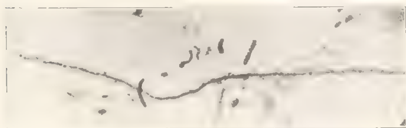


Fig. 1a. Spirochaeta plicatilis (Ehrenbg.). Nach M. Zuelzer.

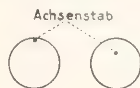


Fig. 1b. Schematischer Querschnitt durch Spirochaeta plicatilis. Nach Zuelzer.

vorstellen. Wie eine schematische Figur (1b) zeigt, wird eine Spirochäte im Querschnitt kreisrund erscheinen, der Achsenstab wird je nach den Windungen und dem Verlauf der Spiralen zentral oder seitlich gelagert sein.

Was die Fortpflanzung betrifft, so sind bisher nur eine einfache Zweiteilung und eine Vielfachteilung in mehrere kleinere Exemplare beobachtet worden. Die Vielfachteilung stellt im wesentlichen auch nur Zweiteilungen dar, die sich besonders an großen Individuen vollziehen. Die Zweiteilung wie die Vielfachteilung sind echte Querteilungen. Bei den Vielfachteilungen kommt es zu verschieden großen Tochterindividuen. Bei den Zweiteilungen, die mehr an kleineren Spirochäten vor sich gehen, kommt es zu gleich großen Tochterspirochäten. Der Achsenfaden zeigt an der Teilungsebene vor der Teilung eine Verdickung, die sich ebenfalls teilt.

b) Cristispira. Von besonderer Bedeutung für die Spironemaceenforschung sind gewisse, im Magen und Darmtraktus der Muscheln lebende, sehr große, durchschnittlich ungefähr 20 bis 50 μ lange und ca. 1/2 bis 2 μ dicke, früher schon bekannte, als Spirochäten und Trypanosomen bezeichnete Formen geworden, da an ihnen die wichtigsten morphologischen und entwickelungsgeschichtlichen Studien gemacht wurden. Der Name Cristispira wurde von Groß 1910 aufgestellt. Groß nannte diese Formen Cristispiren (Fig. 2a) nach einer dem ganzen Zelleib der Länge nach aufsitzenden strukturlosen Membran, Crista (Fig. 2b), dem Bewegungsorganell der Cristispiren. Aehnlich wie die Bakterien sollen auch die Cristispiren von einer derben zelluloseartigen Membran umgeben sein. Nach Swellengrebel, Dobell, Groß, Zuelzer u. a. soll das Plasma plasmolysierbar sein. Chromatin in Form von Kernen oder Bröckchen ist nicht vorhanden. Eine gänzlich verschiedene Auffassung vertreten wieder andere Autoren, Prowazek, Fantham, Gonder, Schellak, Hölling u. a. Nach ihnen ist der Cristispirenkörper von einer feinen plasmatischen Hülle, einem Periplast, umgeben, der von feinen kontraktilen Fibrillen durch-

Fig. 2a. Cristispira pectinis. Nach Groß.

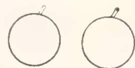


Fig. 2b. Schematischer Querschnitt durch Cristispira. Nach Groß und Zuelzer (rechts).

zogen ist (Fig. 3, a und b). Durch das gleichartige und gleichsinnige Zusammenwirken der Fibrillen wird nach Gonder gleichsam ein Randfaden gebildet, der in seiner Funktion dem Randfaden der Trypanosomen

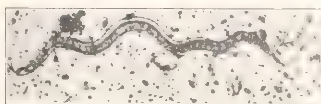


Fig. 3a. Cristispira balbiani. Nach Gonder.

Fig. 3b. Schematischer Querschnitt durch Cristispira. Nach Gonder.

gleicht. Auch Zuelzer nimmt in der Crista einen Randfaden an (Fig. 2b). Während der großwabige Plasmabau der Cristispiren von Groß u. a. als Vielzelligkeit gedeutet wird, treten andere wieder für eine Einzelligkeit ein. Der Periplast endet häufig in eine Art von Schleppgeißel, die aber für die Bewegung der Cristispiren belanglos ist. Die Fortpflanzung ist eine einfache Querteilung

unter Bildung einer Querscheidewand. Auch sind schon cystenartige Gebilde beschrieben worden, deren Bedeutung jedoch unklar geblieben ist. In letzter Zeit berichtete Groß auch von Sporenbildung (Fig. 4). Die Querteilung wird durch eine eigenartige Umbiegung der beiden Teilhälften, Inkurvation, eingeleitet. Schließlich kommt es zu einer engen Verschlingung der Tochterhälften, so daß sehr leicht eine Längsteilung vorgetäuscht werden kann (Fig. 5). Gerade diese Inkurvation war Anlaß zu vielen Irrtümern; man glaubte an eine Längsteilung und suchte in diesem Fortpflanzungsmodus einen Stützpunkt zu einer Angliederung an die Flagellaten. — Chromatin kann in Form äußerst feiner Körnchen, Chromidien, im Plasma suspendiert sein. Achsenstab und Volutinkörner sind nicht vorhanden.

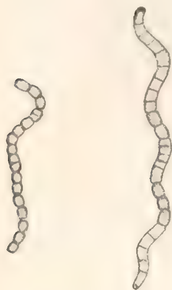


Fig. 4. Cristispira tapetos, Sporenbildung. Nach Groß.

a b

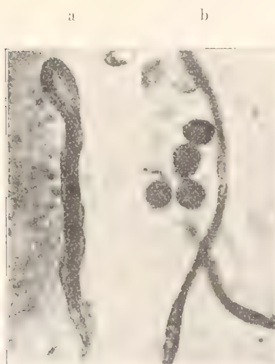


Fig. 5. Inkurvation (a) und Querteilung von Cristispira. Nach Gonder.

Eine große Menge von Cristispiren sind bereits beschrieben worden. Am bekanntesten und auch am häufigsten sind die Cristispiren der Auster und der Flußmuschel, Cristispira balbiani und anodontae. Andere große Formen leben in anderen Muscheln, so Cristispira pinnae in der Pinna, Cristispira tapetos in Tapes, Cristispira pectinis in Pekten. Alle leben hauptsächlich im Kristallstiel, einem gallertigen Gebilde im Magen der Muscheln, das mit der Verdauung im Zusammenhang steht.

c) Spironema. Dieser Gattungsname wurde von Vuillemin 1905 aufgestellt. Während Groß auch für diese äußerst zarten, nur Bruchteile eines μ in der Dicke messenden, ca. 5 bis 25 μ großen Formen eine aufgelagerte Crista annimmt, halten andere Autoren an einem Periplast fest. Der Unterschied gegenüber den Cristispiren besteht in dem Besitz feinster Plasmaanhänge. Wegen ihrer Feinheit sind genauere morphologische Studien an diesen Organismen sehr schwer auszuführen. Kleinste Körnchen und Stäbchen, die im Innern des Plasma liegen, sind verschiedenmal beschrieben worden. Vielleicht hat man es aber hier mit Kunstprodukten zu tun. Die Fortpflanzung ist ebenfalls einfache Querteilung. Manche Autoren halten neben der Querteilung auch noch an einer Längsteilung fest (v. Prowazek, Fantham, Porter u. a.). Die Querteilung ist eine einfache Durchschnürung in der Mitte des Spironemenkörpers. Unter Bildung einer feinen Plasmabrücke gehen dann die beiden Tochterindividuen auseinander. Eventuell kann der Teilung ebenfalls eine Inkurvation vorausgehen. Von Balfour, Blanc, Hindle, Fantham u. a. sind für bestimmte pathogene Blutspironemen kleinste granulaähnliche Gebilde beschrieben worden, die die betreffenden Autoren als gewisse Entwickelungsstadien der Spironemen auffassen. Vielleicht kann man sie den Sporen der Cristispiren von Groß zur Seite stellen.

Die Spiromenen stellen sehr wichtige Formen aus der Familie der Spironemaceen dar, da sie zum Teil schwere Krankheitserreger von Tier und Mensch sind. Teilweise leben sie als harmlose Kommensale im Darm, im Magen und in der Mundhöhle von Tieren und vom Menschen, teilweise auch leben sie im Blut und auch im Gewebe.

d) Treponema. Anschließend an Schaudinns Arbeiten hat Gonder von den Spironemen noch eine besondere Gruppe abgetrennt, die sich durch die Art der Windungen von den Spironemen unterscheiden. Während die Spironemen im allgemeinen nur wenige und flachere Windungen aufweisen, zeichnen sich die äußerst zarten und färberisch häufig sehr schwer darzustellenden Treponemen (4 bis 10 μ lang, $^1/_4$ bis $^1/_2$ μ dick) durch recht zahlreiche und sehr charakteristische, steile Windungen aus. Auch werden häufig in der Ruhe die steilen Windungen beibehalten, während sich die Spironemen in der Ruhe mehr ausstrecken. Ueber den Zellkörperbau und die Fortpflanzung

gilt im wesentlichen das gleiche, was auch für die Spironemen auseinandergesetzt wurde. Sporenähnliche Gebilde sind bei den Treponemen noch nicht beschrieben worden. Die Treponemen, welche ebenfalls als harmlose Schmarotzer der Mundhöhle und als Darmparasiten vorkommen, spielen eine ganz besondere Rolle als schwere Krankheitserreger; so werden Syphilis und Frambösie durch Treponemen hervorgerufen.

3. Systematik. Aus den allgemeinen Ausführungen geht bereits hervor, daß über den Bau und die Beschaffenheit des Spironemaceenkörpers durchaus noch keine vollkommene Uebereinstimmung unter den auf diesen Gebieten arbeitenden Autoren erzielt ist. Während ein Teil, vornehmlich Swellengrebel, Groß, Dobell u. a., für die Bakteriennatur der Spironemaceen eintreten, ohne sie jedoch den Spirillaceen anzugliedern, treten andere, wie Hartmann, Prowazek, Fantham u. a. für die Protozoennatur ein, wieder andere, vornehmlich Schellack und Gonder, haben eine Mittelstellung und trennen vorerst die Spironemaceen als eine besondere Gruppe der Protisten ab, ohne sie der einen oder anderen Gruppe anzugliedern. Auf alle Fälle ist die Bezeichnung Spirillum für diese Organismen grundfalsch. Spirillen sind echte Bakterien, die von einer derben, unbiegsamen Membran umgeben sind, die nichts, als die spiralige Windung des Zellleibes mit den Spironemaceen gemein haben. Keine Flexibilität des Körpers ist bei ihnen vorhanden. Die Bewegung geschieht nicht, wie bei den Spironemaceen durch den plasmatischen Zellleib selbst, und dessen Bewegungsorganell, durch die Crista oder den Periplast, sondern die Bewegung wird ausschließlich durch pol- oder seitenständige Geißeln, wie sie allgemein den Bakterien zukommen, bewerkstelligt. Auch sind gewisse Beziehungen zu den Algen, besonders zu den Cyanophyceen erörtert worden. — Jedenfalls ist die Frage der systematischen Stellung der Spironemaceen zurzeit noch nicht reif genug, um schon jetzt eine feste Meinung vertreten zu können. Solange daher noch nicht einwandfrei diese Streitfragen entschieden sind, ist es vorzuziehen, eine besondere Gruppe von Protisten, die zwischen Flagellaten und Bakterien, vielleicht aber auch zwischen Algen und Bakterien steht, anzunehmen unter Zuhilfenahme der Großschen Einteilung, eine Familie Spironemacea, mit den Gattungen Siprochaeta, Cristispira, Spironema und Treponema.

II. Spezieller Teil.
Die wichtigsten pathogenen Formen.

Unter den Spironemaceen gibt es, wie schon erwähnt, sehr wichtige Krankheitserreger von Tier und Mensch. So werden das Rückfallfieber des Menschen, die Hühnerspironemosis, die Syphilis und die Frambösie, das Tropengeschwür und andere Krankheiten durch Spironemaceen hervorgerufen. Bei Krankheiten mit anderer Ursache können sekundär die Spironemaceen den Krankheitsverlauf sehr ungünstig beeinflussen, so besonders die Angina vincenti, bei Zahngeschwüren, Darmerkrankungen u. dgl. Für viele besonders im Mund, im Rachen und im Darme lebende Formen ist die Pathogenität noch nicht erwiesen.

Hühnerspironemosis. Von tierpathogenen Formen sind die wichtigsten Spironema gallinarum, Spironema equina und Spironema Theileri. Letztgenannte Formen, welche im Blut von Pferd und Rind leben, und nur in tropischen und subtropischen Ländern vorkommen, können vorübergehend Fieber verursachen, sind aber sonst harmloserer Natur. Anders ist Spironema gallinarum (Fig. 6), der Erreger der Hühnerspironemosis, früher Hühnerspirillosis genannt. Die äußerst zarten Spironemen von leicht spiraliger Form verursachen durch ihre rasche Vermehrung im Blute der erkrankten Hühner eine schwere Anämie, die sehr schnell zur allgemeinen Abmagerung und zum Tode führt. Durchfall und auch Lähmungserscheinungen begleiten sehr häufig die Krankheit. Bei einer natürlichen Infektion währt die Krankheit vom Tage der Infektion an gerechnet ca. 8 bis 10 Tage. — Die Hühnerspironemen machen einen bestimmten Wirtswechsel durch. Der Zwischenwirt, der leidende Teil, ist das Huhn, der eigentliche Wirt, der Krankheitsüberträger ist eine bestimmte Zeckenart der Gattung Argas (Fig. 7). Von besonderem Interesse ist hierbei die Vererbung der Infektion in den Zecken. Bekanntlich machen die Zecken vom abgelegten Ei bis zum geschlechtsreifen Tier eine komplizierte Metamorphose durch. Die frisch ausgeschlüpfte Argaslarve bleibt, um sich mit Blut voll-

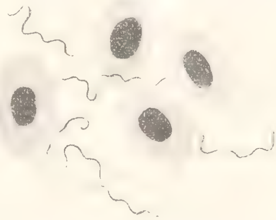


Fig. 6. Spironema gallinarum, Erreger der Hühnerspironemosis. Original.

saugen zu können, ca. 4 bis 5 Tage am Wirtstier haften, fällt dann vollgesogen ab, um in Bretterritzen oder auf der Erde versteckt ihre Häutung durchmachen zu können. Die aus der Häutung hervorgehenden Nymphen befallen nur für ganz kurze Zeit ihren Wirt,



Fig. 7. Argas persicus Uebertrager von Spironema gallinarum. Original.

um nach 15 bis 30 Minuten vollgesogen abzufallen und die weitere Häutung zu vollziehen. So geht die Blutaufnahme bei dem weiteren Entwickelungsstadium in der gleichen Weise vor sich. Und die geschlechtsreifen weiblichen Zecken gelangen nach der Befruchtung nach jeder frischen Blutaufnahme zu einer neuen Eiablage. Ist nun einmal eine Zecke infiziert, so bleibt sie infiziert, und die nachfolgende Generation bleibt ebenfalls infiziert. Es ist begreiflich, daß auf diese Weise in einer Gegend, die einmal verseucht ist, nur schwer ein Huhn aufkommen wird, und daß dort, wo diese Seuche auftritt, sehr schnell ein Hühnerbestand zugrunde gerichtet wird. Ein Huhn, welches die Krankheit übersteht, bleibt immun. Auch kann man heute sehr leicht aktiv immunisieren, indem man gesunden Hühnern abgetötetes Spironemenmaterial injiziert; die Abtötung kann durch Erhitzen auf 60° C erfolgen. Oder man kann chemotherapeutisch vorgehen, die Hühner künstlich infizieren und dann mit geringen Salvarsandosen die Krankheit wieder heilen. Die auf diese Weise behandelten Hühner bleiben wenigstens für lange Zeit gegen die Krankheit geschützt.

Die Hühnerspironemosis ist eine über die tropischen und subtropischen Länder sehr verbreitete Krankheit. Besonders im nördlichen Afrika und im Sudan, in Kleinasien und in Südrußland und auch in Brasilien ist die Krankheit weit verbreitet. Auf bestimmte Vogelarten läßt sich Spironema gallinarum auch künstlich übertragen.

Rückfallfieber. Eine andere, für den Menschen besonders schwere, in den Tropen und den Subtropen weit verbreitete Krankheit, das Rückfallfieber oder auch Rekurrens genannt, welches auch bis nach Europa, nach den Balkanländern und nach Rußland vorgedrungen ist, wird ebenfalls durch eine Spironeme hervorgerufen. Nach dem immunisatorischen Verhalten unterscheidet man verschiedene Arten, die man morphologisch gar nicht unterscheiden kann. Vielleicht ist auch diese Art der Unterscheidung nicht voll berechtigt, da wir auch bei anderen Protozoen, beispielsweise bei den Trypanosomen, hinsichtlich ihres immunisatorischen Verhaltens sehr variierende Formen oder besser Stämme einer und derselben Art kennen. Man unterscheidet Spironema recurrentis, den Erreger der europäischen Rekurrens, Spironema Duttoni, den Erreger des afrikanischen Rückfallfiebers, Spironema Novyi, den des amerikanischen u. a. Die Immunität gegen den einen dieser Erreger hat keine Immunität gegen den anderen zur Folge und umgekehrt. Auch diese Spironemen, die sich morphologisch kaum von den Hühnerspironemen unterscheiden (Fig. 8), werden

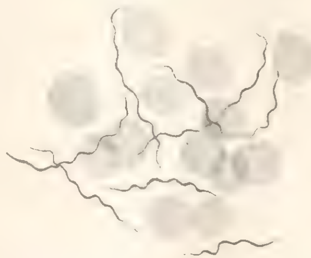


Fig. 8. Spironema recurrentis, Erreger des Rückfallfiebers des Menschen. Original.

durch Zecken übertragen. Ob außer den Zecken noch andere Ektoparasiten, wie Läuse oder Wanzen, in Betracht kommen, ist noch nicht bestimmt bewiesen. Vielleicht können auch Argasiden besonders für Rußland in Frage kommen. Der für die deutschen Kolonien wichtigste Ueberträger ist eine Zeckenart Ornithodorus moubata (Fig. 9), die gleich wie die Argasiden, eine komplizierte Metamorphose vom Ei bis zum geschlechtsreifen Tier durchmacht. Die Larven, Nymphen und geschlechtsreifen Zecken befallen in der Nacht den Menschen, um sich sehr rasch vollzusaugen und sich dann wieder in der Erde zu verkriechen, wo sie die Häutung, resp. die Eiablagen vollziehen. Auch bei ihnen wird die Infektion vom Muttertier auf das Ei und damit auf die folgende Generation vererbt. Die Rekurrensspironemen sind leicht auf Affen, Ratten und Mäuse zu übertragen.

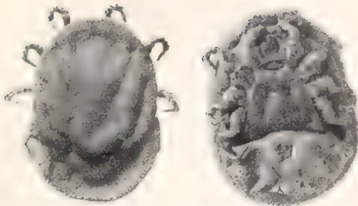


Fig. 9. Ornithodorus moubata, Ueberträger von Spironema Duttoni (afrikanisches Rückfallfieber). Original.

Das durch die Spironemen verursachte Fieber hat häufig einen sehr hartnäckigen Verlauf und kann besonders bei Komplikationen durch andere Krankheiten verhängnisvoll werden. Während man bisher nichts gegen den Parasiten tun konnte, hat man neuerdings im Salvarsan ein ausgezeichnetes Mittel die Spironemen mit einer einmaligen Dosis abzutöten. Nebenstehende Figur 10 gibt eine Darstellung über den

fasser durchaus bestätigen. Ohne daß Zecken Neuinfektionen ausgesetzt wurden, konnten Spironemen in denselben und den nachfolgenden Generationen immer nachgewiesen werden.

Ulcus tropicum. Ein Erreger eines in den Tropen, besonders an den Extremitäten des Menschen auftretenden Geschwürs, des Ulcus tropicum, wird ebenfalls, wie Keyserlitz und Mayer nachwiesen, durch eine Spironemacee hervorgerufen, Spironema Schaudinni. Hier vermögen die Spironemen tief in das Gewebe einzudringen.

Von anderen Spironemen sind vor allem noch die Mundspironemen zu erwähnen, Spironema buccalis, Spironema intermedia und dann die mit Treponema bei Syphilisgeschwüren und bei Papilomen sehr häufig auftretende Spironema refringens. Diese Spironemen sind keine eigentlichen Krankheitserreger, vielmehr sind sie Parasiten, die sekundär eine wichtige Rolle spielen können und mit anderen Krankheitskeimen (Bakterien) tief in das Gewebe eindringen können. Besonders häufig findet man bei der Angina Rein-

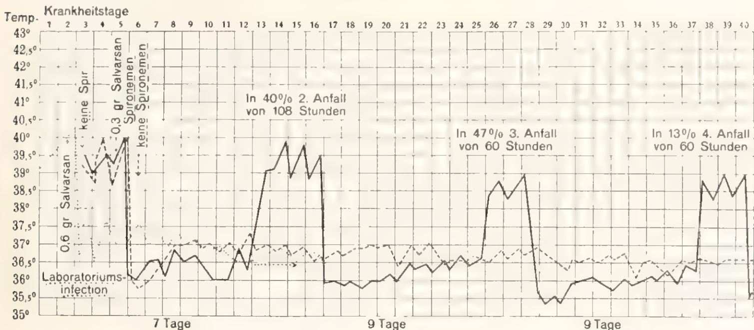


Fig. 10. Verlauf von Rückfallfieber des Menschen (punktiert: nach Salvarsanbehandlung). Nach Iversen.

Fieberverlauf bei unbehandelter Rekurrens und bei Behandlung mit Salvarsan.

Viele Autoren nehmen an, daß die Spironemen in den Zecken sich zu kleinsten sporenähnlichen Formen umbilden (Blanc, Hindle, Fantham). Nach Marchoux verschwinden aber die Spironemen in den Zecken überhaupt nicht, sondern sie verlieren nur an Lichtbrechung, auch lassen sie sich färberisch nur sehr schwer nachweisen. Erst mit einer neuen Blutaufnahme treten die Spironemen wieder deutlicher hervor. Die Untersuchungen von Marchoux kann Ver-

kulturen von Spironemen, die erst mit der Heilung wieder verschwinden. Auch bei anderen Erkrankungen der Mundhöhle treten sie manchmal in ungeheuren Mengen auf und können den Krankheitsverlauf höchst ungünstig beeinflussen (Fig. 11. Spironema buccalis, Treponema dentium vergesellschaftet mit Bacillus fusiformis).

Syphilis. Die für den Menschen bei weitem wichtigsten Spironemaceen sind die Treponemen. Der von Schaudinn entdeckte Erreger der Syphilis ist, wie das Experiment und auch die in den letzten Jahren erst gelungenen



Fig. 11. Spironema buccalis (a), Treponema dentium (b), zusammen mit Bacillus fusiformis (c) aus dem Mund des Menschen. Original.

Kulturen völlig einwandfrei bewiesen, Treponema pallidum, so genannt, weil sich diese Form gegenüber anderen Spironemaceen äußerst schwer färben läßt und eben deshalb auch wohl so lange Zeit unentdeckt bleiben konnte. Heutzutage ist es ein leichtes, mit Hilfe der Dunkelfeldbeleuchtung, die überhaupt für die Spironemaceenforschung unentbehrlich geworden ist, eine Frühdiagnose auf Syphilis zu stellen durch den Nachweis des Treponema pallidum (Fig. 12).

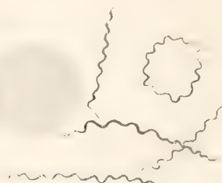


Fig. 12. Treponema pallidum, Erreger der Syphilis. Original.

Treponema pallidum ist eine mit charakteristischen steilen Windungen ausgezeichnete Form, die sich sehr schnell im menschlichen Körper auf dem Wege der Blut- und Lymphbahnen verbreitet und die sich besonders in den rezenten Fällen in fast allen syphilitischen Krankheitsprodukten nachweisen läßt. Bei hereditärer Lues, in luetischen Föten sind häufig die Organe völlig überwuchert von Treponemen. Bei experimenteller Uebertragung von Lues auf Affen oder Kaninchen treten auch hier die Treponemen in den Krankheitsprodukten, Schankern und Papeln manchmal fast in Reinkulturen auf. Ueber den Bau ist das wesentlichste bereits vorher gesagt. Die feinen Periplastanhänge laufen an den Enden in feinste Geißeln aus, was schon Schaudinn feststellen konnte und durch Levaditi auch bestätigt wurde. In der Größe variieren die Treponemen sehr, man findet häufig außerordentlich kleine, dann aber wieder auch sehr lange Formen. Vielleicht kann auch hier ähnlich wie bei der Spirochaeta plicatilis neben der einfachen Querteilung noch eine Vielfachteilung einhergehen.

Frambösie. Morphologisch gar nicht von Treponema pallidum zu unterscheiden ist das Treponema pertenue, der Erreger der tropischen Frambösie, einer schweren Hauterkrankung. Auch hier ist auf Grund des Nachweises der Treponemen eine sichere und rasche Diagnose zu stellen. Chemotherapeutisch werden ebenso wie die anderen Spironemen die Treponemen durch Salvarsan besonders stark angegriffen und abgetötet.

Treponema pallidum und pertenue werden durch den Kontakt von einem Menschen auf den anderen übertragen. Auch für die Rückfallfieber- und die Hühnerspironemen ist experimentell nachgewiesen, daß sie rein mechanisch durch die gesunde Haut in Mensch und Tier einzudringen vermögen und auf diese Weise eine Infektion hervorrufen können.

Zum Schluß sei noch eine andere Form aus der Mundhöhle des Menschen erwähnt, Treponema dentium (Fig. 11b), eine äußerst kleine zarte Form, die ebenso wie Spironema buccalis und intermedia sekundär vielleicht eine gewisse pathogene Wirkung ausüben kann.

Literatur. ***A. Balfour,*** *The life-cycle of Spirochaeta gallinarum. Parasitologie, Vol.* 5, *Nr. 2, 1912.* — ***G. R. Blanc,*** *Les spirochètes chez les Ixodidae. Fac. Med. Paris 1911.* — ***O. Bütschli,*** *Ueber den Bau der Bakterien und verwandte Organismen, 1890.* — ***Ch. Ehrenberg,*** *Die Infusionstierchen als vollkommene Organismen, 1838.* — ***H. B. Fantham,*** *Some researches on the life-cycle of Spirochaetes. Annals Trop. med. Parasit., Vol.* 5, *1911.* — ***R. Gonder,*** *Spirochatenstudien. Zool. Jahrb., Suppl. 15, Bd.* 1, *1912.* — ***J. Gross,*** *Ueber Systematik, Struktur und Fortpflanzung der Spironemacea. Zentralbl. f. Bakt. usw. 1. Abt. Originale, Bd.* 65, *Heft 1/3, 1912.* — ***Dutton und Dodd,*** *The nature of human tick fever in the Eastern part of the Congo free state. Liverpool Sch. Trop. med., Memoir* 17. — ***M. Hartmann,*** *Das System der Protozoen. Arch. f. Prot., Vol.* 10, *1909.* — ***E. Hindle,*** *On the life-cycle of Spirochaeta gallinarum. Parasitologie, Vol.* 4, *Nr. 4, 1912.* — ***E. Marchoux und L. Couvy,*** *Argas et Spirilles. Bull. d. l. Soc. de Path. exot., T.* 5, *Nr. 2, 1912.* — ***P. Mühlens,*** *Treponema pallidum. Handbuch der pathogenen Protozoen, herausgegeben von S. v. Prowazek. Leipzig 1912.* — ***Novy und Knapp,*** *Spirochaeta Obermeieri. Hyg. Lab. Univers. of Michigan, 1906.* — ***S. v. Prowazek,*** *Morphologie und entwickelungsgeschichtliche Untersuchungen über Hühnerspirochäten. Arb. a. d. Kaiserl. Gesundheitsamt, Bd.* 23, *Heft 2, 1906.* — ***F. Schaudinn,*** *Zur Kenntnis der Spirochaeta pallida. Deutsch. med. Wochenschr., Nr.* 42, *1905.* — ***C. Schellak,*** *Studien zur Morphologie und Systematik der Spirochäten aus Muscheln. Arb. a. d. Kaiserl. Gesundheitsamt, Vol.* 27, *1907.* — ***N. H. Swellengrebel,*** *Neuere Untersuchungen über die vergleichende Cytologie der Spirillen und Spirochäten. Zentralbl. Bakt. usw., 1. Abt. Orig., Vol.* 49, *1909.* — ***Wladimiroff,*** *Rückfallfieber.*

Handbuch der pathogenen Mikroorganismen. Jena 1903. — **M. Zuelzer**, *Spirochaeta plicatilis. Arch. f. Prot., Vol. 24, 1911.*

R. Gonder.

Spitzenentladungen.

1. Begriff der Spitzenentladung. Stille Entladung. 2. Negative Spitzen. a) Elektrodenbeschaffenheit. b) Einfluß des Drucks. 3. Positive Spitzen. 4. Spannung und Strom bei der Spitzenentladung. 5. Büschelentladung. 6. Glimm- und Bogenentladungen an Spitzen. 7. Chemische Wirkung der stillen Entladung. a) Ozonbildung bei der Spitzenentladung. b) Auffassung der Wirkung. c) Stille Entladung in Ozonröhren. d) Ozon zerstörende Wirkung der Entladung. e) Stickstoffoxydation bei der stillen Entladung. 8. Ionenbeweglichkeit bei der Spitzenentladung. 9. Der elektrische Wind. 10. Die Korona der Hochspannungsleitungen.

1. Begriff der Spitzenentladung. Stille Entladung. Man hat eine selbständige elektrische Entladung aus Spitzen oder Elektroden starker Krümmung schon vor langer Zeit beobachtet. Ein eingehendes Studium der Erscheinungen dieser Entladungen ist aber erst im Zeitraum der letzten 15 Jahre erfolgt. Die Entladungsform der Elektrizität kann aus Spitzen diejenige sein, wie man sie auch an anderen Elektroden beobachtet, nämlich die Funkenentladung. Es tritt jedoch diese Entladungsform an scharfen Elektroden und Spitzen verhältnismäßig selten auf und man beobachtet infolge der großen Dichte der Elektrizität an solchen Elektroden zumeist Entladungen mit viel geringerem, oftmals verschwindendem Geräusch im Vergleich zur Funkenentladung, was der Spitzenentladung auch die Bezeichnung „stille Entladung“ eingetragen hat. Die stille Entladung, welche im folgenden ausführlich besprochen werden soll, zerfällt jedoch in verschiedene Arten, die man stille Entladung erster, zweiter und dritter Ordnung nennen kann, die sich, wie unten gezeigt werden wird, durch den „Leitwert“ der durchsetzten Gasstrecke voneinander unterscheiden. Man kann auch die stille Entladung erster Ordnung schlechthin „stille Entladung“ nennen, diejenige zweiter Ordnung „Glimmentladung“ und endlich diejenige dritter Ordnung den „Büschellichtbogen“ oder „Bogenentladung“.

Man kann die einfachste Form der Spitzenentladungen, ein selbständiges Ausströmen der Elektrizität aus einer Elektrode starker Krümmung dadurch erreichen, daß man eine Metallspitze einer ausgedehnten Elektrode, etwa einer Platte von mehreren Zentimetern Radius, in geeignetem Abstand je nach der benutzten Spannung ca. 0,5 bis 5 cm, in einem Gas von Atmosphärendruck gegenüberstellt und an diese Elektroden eine Potentialdifferenz von einigen 1000 Volt anlegt. Mit Hilfe dieser Anordnung läßt sich die Erscheinung der positiven und negativen Spitzenentladung oder stillen Entladung erster Ordnung voneinander trennen und getrennt beobachten. Bei anderen Elektroden treten im allgemeinen die positive und negative Entladungsform gleichzeitig auf. Als Gas nehmen wir, falls nichts anderes bemerkt ist, die Luft an. Die Platte großer Oberfläche verbindet man zweckmäßig mit der Erde, ebenso wie der eine Pol der Elektrizitätsquelle zur Erde abgeleitet wird. Die Elektrode großer Krümmung oder die Spitze ist dann als Spannungselektrode zu bezeichnen; an ihr bildet sich je nach dem Vorzeichen der Ladung negative oder positive Spitzenentladung aus, gekennzeichnet durch eine Lichtwirkung, die das Zustandekommen der selbständigen Entladung begleitet, während an der Erdelektrode meistens kein Licht auftritt.

2. Negative Spitzen. Negative Spitzenentladung oder negative stille Entladung erhält man, wenn man bei ca. 1 cm Elektrodenentfernung die Spannungselektrode auf ungefähr 7000 Volt negativ auflädt. Ein in die Erdleitung geschaltetes Galvanometer zeigt dann einen Strom an und gleichzeitig erscheint an der Spitze, der Spannungselektrode, in Luft ein heller bläulicher Stern, der bei genauer Beobachtung auch mit unbewaffnetem Auge am unteren Ende der Erdplatte zugewendet eine büschelförmige Verbreiterung rötlichen Aussehens trägt. Das Wesen dieser Entladungsform tritt deutlich hervor, wenn man die Spitze mit Hilfe eines Mikroskopes mit nicht zu starker Vergrößerung betrachtet. Man erkennt dann in der Strombahn genau dieselben Einzelheiten, wie man sie bei der Entladung der Elektrizität in luftverdünnten Räumen, im Geißlerrohr, unter der Wirkung einer Gleichspannung auftreten sieht. Wie man in diesem Falle an der Kathode die erste gelblich leuchtende Kathodenschicht, den Kathodendunkelraum, das blaue, im Sauerstoff weißliche Glimmlicht, endlich den Faradayschen Dunkelraum und die positive Lichtsäule beobachtet, so erkennt man auch an der negativen Spannungselektrode bei Atmosphärendruck dieselben bekannten Teile der Glimmentladung nur in den entsprechenden kleineren Dimensionen. Die erste Kathodenschicht ist nur bei starker Vergrößerung und etwas vermindertem Gasdruck zu erkennen, während die übrigen Teile verhältnismäßig leicht sichtbar werden (s. Fig. 1, die nach einer Zeichnung des Vorgangs wiedergegeben ist). Ein Unterschied gegenüber der Glimm-

entladung besteht jedoch darin, daß die positive Lichtsäule, hier als positiver Büschel

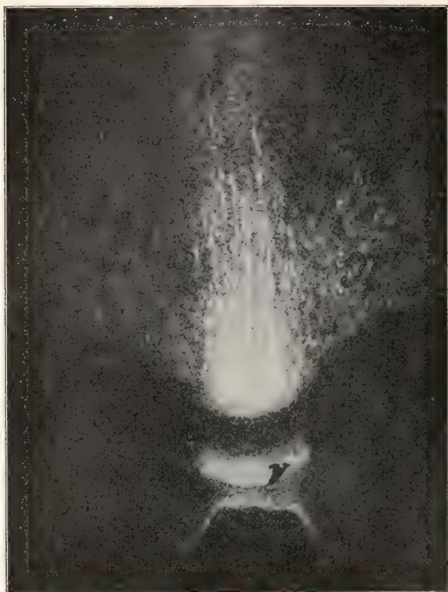


Fig. 1. r Blaues Glimmlicht, π positiver Büschel, γ starker leuchtende Bahn in der Verlängerung der Spitze.

bezeichnet, sehr wenig ausgebildet ist, in der Luft anstatt auf der Anode endigt und gegen die Anode hin einen Dunkelraum von verhältnismäßig großer Länge aufweist. Der Vorgang ist daher so aufzufassen, daß unter dem Einfluß der Elektrodenspannung von der Kathode ausfliegende Elektronen in dem sehr dichten Gase nur sehr kleine Wegstrecken zu durchlaufen vermögen, bis durch Stoß eine starke Ionisierung des Gases eintritt, die in dem blauen Glimmlicht zum Ausdruck kommt. Die Elektronen besitzen ihre große Geschwindigkeit also nur in dem ersten sehr kurzen Dunkelraum und lagern sehr bald neutrale Masse aus dem Gase an, wodurch ihre Geschwindigkeit stark verlangsamt wird. Die nunmehr zu Ionen gewordenen Elektronen geraten zum Teil unterhalb des Glimmlichts in das dem Faradayschen Dunkelraum entsprechende dunkle Gebiet, in welchem die Ionisation gering ist und die Feldstärke wächst, wodurch eine so große Beschleunigung eintreten kann, daß nach einiger Zeit von neuem Ionisation des Gases eintreten kann, welche in dem positiven Büschel zum Ausdruck kommt. Das Aussehen dieses Büschels ist in Luft rötlich, in Sauerstoff weißlich. Seine Gestalt ist so, daß von einem mittleren Stiel aus nach beiden Seiten Verbreiterung erfolgt, etwa einem kegelförmigen Gebilde vergleichbar. Die stärkste Ionisation findet auf dem Stiele des Büschels statt, erkenntlich am stärksten Leuchten. Die Ausbildung des Stieles dieses positiven Büschels und sein Fortsatz in dem rötlichen positiven Licht hängen von der Stromdichte an der Spitze ab (s. Fig. 1). Die Reichweite des positiven Büschels in Gase ist durch die Spannung der negativen Elektrode bedingt und hängt vom Abstande zwischen Spitze und Erdplatte und vom Gasdruck ab. Haben die Ionen die vom Büschel eingenommene Strecke durchlaufen, so ist ihre Geschwindigkeit so weit gesunken, daß kein Leuchten des Gases mehr eintritt. Daher ist der größte Teil der Entladungsbahn bei dieser Entladungsform ohne Licht. An der Erdplatte ist in der Regel kein Leuchten zu bemerken, bisweilen sieht man bei Platten, die etwas gekrümmt sind, eine rötliche positive Lichthaut an denselben. Das Bild dieser negativen Spitzenentladung ist vom Abstand der Spitze und Platte ziemlich unabhängig; es wächst allerdings mit der Entfernung die zur Erzeugung des Büschels notwendige Elektrodenspannung sehr stark an. Bei geringen Entfernungen (ca. 1 cm) gelingt es bei genügender Elektrizitätszufuhr, die Lichterscheinung des Büschels bis zur Erdplatte zu verfolgen, so daß dann der ganze Raum zwischen den Elektroden mit Licht erfüllt ist, jedoch der frühere dunkle Teil mit nur sehr schwach sichtbarem. Der beschriebene positive rötliche Büschel geht dabei in der Entfernung von einigen Millimetern von der Spitze in einen schwach rot leuchtenden, kegelförmigen, breiten Büschel über, der sich bis zur Erdplatte erstreckt.

2a) Elektrodenbeschaffenheit. Hin-

sichtlich des Einflusses der Elektrodenbeschaffenheit auf die beschriebene Entladungsform ist zu erwähnen, daß zunächst die Form der Elektrode maßgeblich ist für die bei gegebenem Spitzenpotential zustande kommende Stromdichte. Nimmt man eine kleine Kugel von ca. 1 bis 2 mm Durchmesser anstatt einer scharfen Spitze, so erkennt man, während die Entladungsform ungeändert bleibt, unter dem Mikroskop eine Ausbreitung des negativen Glimmlichtes über eine größere Fläche. Gleichzeitig verschwindet der Stiel des ansitzenden positiven Büschels; das positive Licht im Büschel ist gleichmäßig verteilt, die Bahn größerer Leitfähigkeit und daher stärkeren Leuchtens ist verschwunden. Erzeugt man die Entladung an einem dünnen Platindraht (ca. $^1/_4$ mm dick), so findet man, wie Warburg gezeigt hat, daß sich das Glimmlicht über einen größeren Teil der Oberfläche hin erstreckt, falls die Spitze eine längere Zeit benutzt worden ist, wobei die Stromdichte bei gleicher Potentialdifferenz der Elektroden ebenfalls verkleinert wird. Die Bedeutung dieser Tatsache für die chemische Wirkung der stillen Entladung wird unten besprochen werden.

2b) Einfluß des Drucks. Erniedrigt man den Druck des Gases, in welchem die negative Spitze wie vorher Spannungselektrode ist, so sind in demselben die 3 kathodischen Schichten besser zu unterscheiden, der Vorgang wird dem im Geißlerrohr vorhandenen ähnlicher. Unmittelbar an der Spitze ist die gelblich leuchtende Kathodenschicht zu erkennen. Der darauf folgende Kathodendunkelraum ist größer geworden und das blaue Glimmlicht hat sich ebenfalls ausgedehnt. Die positive Lichtsäule, der Büschel, ist hier sehr wenig ausgeprägt und verschwindet meist ganz, dagegen bemerkt man an der Erdplatte eine rote Lichthaut positiven Lichtes, das von dem blauen Glimmlicht durch einen dunklen Raum getrennt ist; in diesem Raum bewegen sich der Hauptsache nach negative Ionen, das Gas hat also negative innere Ladung. Die Spitzenentladung zeigt in diesem Falle noch ausgeprägtere Aehnlichkeit mit der Glimmentladung, worauf zuerst von J. Stark aufmerksam gemacht worden ist.

3. Positive Spitzen. Nimmt man in derselben Anordnung wie oben eine positive Ladung der Spitze vor, so zeigt sich dem unbewaffneten Auge an derselben bei geringer Stromstärke eine helle, rötliche Lichthaut positiven Lichtes, ähnlich dem anodischen Glimmlicht im Geißlerrohr. Negative Ionen aus dem Gase fliegen auf die Anode zu und bewirken an ihr durch Stoß neue Ionisation und infolge der erlangten Geschwindigkeit das rötliche Leuchten. Bei größerer Stromstärke entwickelt sich aus der Spitze ein an der Wurzel rötlich aussehender Büschel, der zunächst wenig verbreitert ist, sich jedoch, je mehr er in dem Gase vordringt, mehr und mehr aufspaltet, indem gleichzeitig das Leuchten des Gases eine blaue Farbe zeigt, falls die Entladung in Luft erfolgt. Positive Ionen werden hierbei unter dem Einfluß des elektrischen Feldes in das Gasinnere getrieben und rufen hier durch Stoß unter gleichzeitigem Leuchten starke Ionisation hervor. Bei Vergrößerung des Elektrodenabstandes bleibt die Erscheinung in der Art die gleiche, jedoch verbreitert sich der positive Büschel mit wachsendem Abstande immer mehr und die Stromdichte in einzelnen Fäden der Entladung wird erheblich kleiner; die Figuren 2 bis 4

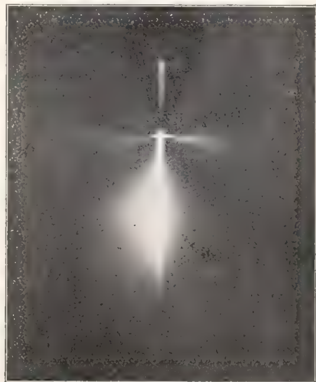


Fig. 2. Spitze positiv. Entfernung 2 cm.

zeigen das Zustandekommen des positiven Büschels und seine Verbreiterung. Oefters tritt nicht nur ein einzelner Büschel sondern mehrere an der Spitze gleichzeitig auf. Bei kleinen Abständen verlieren die Spitzen nach längerer Benutzung oftmals die Fähigkeit, diesen positiven Büschel zu bilden, indem statt dessen die Lichthaut oder Funkenbildung sich zeigt. Man kann dann den Büschel unter Vorschaltung einer kleinen Funkenstrecke (0,1 mm) wieder hervorrufen; auch kleine Kugeln liefern so den Büschel, was bei direkter positiver Ladung ohne Vorschaltung einer Funkenstrecke niemals der Fall ist. Die Elektrizitätszufuhr kann bis zur Funkenstrecke durchaus kontinuierlich erfolgen, während sie in der Funkenstrecke und im Büschel intermittierend ist. Diese Intermittenz zeigt auch schon der Ton an, welchen der Büschel in Luft erzeugt, und welcher von der Krümmung der Elek-

trode abhängig ist; derselbe wird um so höher, je schärfer die Spitze ist, was man leicht bei größeren Abständen der Elektroden beobachten kann. Je größer der Abstand zwischen der Spannungselektrode und der Platte wird, desto mehr hängt das Aussehen des erzeugten Büschels von der Größe der Krümmung der Spannungselektrode und der Stromdichte, die man anwendet, ab. Je schärfer die Spitze ist, desto weniger Verästelungen beobachtet man in der Nähe der Elektrode, weil offenbar durch größere Dichte der Ladung an der Spitze um so leichter in dem einmal eingeschlagenen Weg der Entladung Ionenbildung stattfinden kann. Das Gleiche muß für eine Erhöhung der Stromstärke gelten. Immer findet man ein geringes Abweichen der nachströmenden Ladung aus der einmal eingeschlagenen Bahn, also geringe Verästelung, bei großer Ionendichte in dem einmal eingeschlagenen Weg der Entladung. Kugeln von 2 bis 3 cm Durchmesser liefern bei großen Elektrodenabständen Büschel, die mit dünnem Stiel auf der Kugel aufsitzend in 1 bis 2 cm Entfernung starke Verästelung aufweisen.



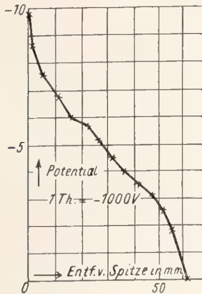
Fig. 3. Spitze positiv. Entfernung ca. 4 cm.

4. Spannung und Strom bei der Spitzenentladung. Nach den beschriebenen Erscheinungen kann man sich von dem Abfall der Spannung innerhalb des Entladungsraums folgendes Bild machen: Bei negativer Spitze mit ausgebildetem blauem Glimmlicht und Dunkelraum liegt ein verhältnismäßig großer Abfall der Spannung in der Nähe derselben, während bei positiver Spitze, welche keinen Dunkelraum aufweist, der Abfall in der Spitzennähe kleiner sein muß. Praktisch kann man diesen Kathodenfall in der Nähe der negativen Spitze bei Atmosphärendruck nicht messen. Will man in der Entladungsbahn den Spannungsfall untersuchen, so führt man eine dünne Drahtsonde in dieselbe ein. Man mißt mit derselben das Produkt Stromdichte × Widerstand. Da aber die Stromdichte wegen der seitlichen Ausbreitung nicht überall dieselbe ist, kann man ohne die Kenntnis derselben keinen Schluß auf den Spannungsfall ziehen. Nach Warburg erhält man hierbei folgende in der Figur 5 gezeichnete Resultate. Infolge der großen Stromdichte an der Spitze ist der Spannungsfall in ihrer Nähe sehr groß, verläuft dann im übrigen Gasraum fast linear, um in der Nähe der Erdplatte erheblichere Werte anzunehmen, was auf eine Anhäufung von Elektrizität an dieser Stelle hinweist. Will man an einer negativen Spitze mit Glimmlicht, Dunkelraum und Büschel den



Fig. 4. Spitze positiv. Entfernung ca. 10 cm.

Kathodenfall mit Hilfe der Sonde bestimmen, so muß man den Gasdruck erniedrigen, damit man mit der Sonde eine größere Nähe der Spitze vermeiden kann. Bei niedrigerem Gasdruck rückt ja das Glimmlicht von der Spitze ab, so daß schließlich selbst bei einer Entfernung von mehreren Millimetern die Sonde in dasselbe taucht, was zur Bestimmung des Kathodenfalles notwendig ist. Auf diese Weise ist zuerst von Stark eine Messung des Kathodenfalles vorgenommen worden. Er fand für negative Spitzen den gleichen Wert des Kathodenfalles wie beim Glimmlicht des Geißlerrohres, ungefähr 340 Volt, während der Anodenfall an der positiven Spitze in Luft einen höheren Wert aufwies, nämlich 440 Volt.



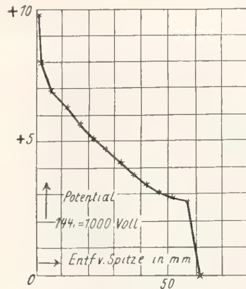


Fig. 5.

Erniedrigt man die Potentialdifferenz der Elektroden allmählich mehr und mehr, so erreicht man einen Punkt, bei welchem die selbständige Strömung in Gase abreißt. Eine solche ist also in Gase nicht mehr bei beliebig geringen Potentialdifferenzen der Elektroden aufrecht zu erhalten. Die geringste Spannung, bei welcher die selbständige Strömung noch vorhanden ist, heißt das Minimumpotential. Dasselbe ist für negative und positive Spitze verschieden, hängt im gleichen Gase von der Entfernung der Elektroden und der Schärfe der Spitze, weniger von deren Material ab. Ist die Entladung einmal durch Verringerung des Potentiales beim Minimumpotential erloschen, so setzt sie bei neuer Steigerung desselben nicht wieder bei demselben ein, vielmehr muß man je nach den Bedingungen der Spitze und des Gases oftmals zu bedeutend höheren Werten des Potentials gehen, um die Entladung entstehen zu lassen. Bei Veränderung des Gases ist der Druck und die Temperatur, endlich auch die Natur desselben von wesentlicher Bedeutung. Man kann nach Warburg für den Strom setzen:

$$i = c\,V.(V - m),$$

wo c und m für die entsprechende Entladungsform Konstanten sind, V das Entladungspotential bedeutet. Diese Gleichung ist von Müller bis zu Potentialdifferenzen von 20000 Volt bestätigt worden und auch in neuerer Zeit von Hovda für Entfernungen von 5 bis 500 mm untersucht worden; sie erwies sich für alle Fälle gültig.

5. Büschelentladung. Man unterscheidet öfters bei der „stillen Entladung" zwischen „Spitzenentladung" und „Büschelentladung", indem man unter Spitzenentladung nur diejenigen Fälle versteht, in denen bei negativer Spitze das blaue Glimmlicht als leuchtender Stern an der Elektrode vorhanden ist, und eine positive Spitze die rötliche Lichthaut zeigt. Tritt dann durch Erhöhung der Stromstärke, sei es durch Aenderung des äußeren Widerstandes oder durch Erhöhung der EMK die positive Lichtsäule in Gestalt des Büschels hinzu, so nennt man diese Entladungsform wohl Büschelentladung. Die Elektrodenspannung verhält sich in beiden Fällen, ob ein Büschel vorhanden ist oder nicht, derart, daß sie mit wachsender Stromstärke ansteigt. Vermehrt man den Abstand der Elektroden, so wächst die zur Erzeugung der Entladung notwendige Spannung bedeutend. Bei einer kugelförmigen negativen Spannungselektrode und großem Elektrodenabstand (ungefähr 10 cm) zeigt der an der negativen Elektrode vorhandene Büschel gegenüber dem oben besprochenen Falle im Aussehen einen großen Unterschied. Während bei kleinen Abständen an der negativen Spitze der Büschel kegelförmig sich verbreiternd im Gase ohne Bewegung sich einstellte, ist hier das Auftreten desselben mit starkem Geräusch verbunden; der Büschel verbreitert sich nicht, sondern schießt, wie die Figur 6 es zeigt, in schmaler Bahn in das Gas hinein. Im nächsten Augenblick wechselt er seinen Standort, so daß die einzelnen aufeinander folgenden Büschel auf der Kugel hin- und herlaufen. Die Figur zeigt mehrere solcher

Büschel, die zeitlich nacheinander entstehen gleichzeitig, da die photographische Platte eine bestimmte Zeit exponiert wurde. Der Uebergang der büschellosen Entladung in die Form mit Büschel ist an einer Spitze um so leichter möglich, je schärfer die benutzte



Fig. 6.

Spitze ist, da in diesem Falle die im Dunkelraum zwischen Glimmlicht und Erdplatte vorhandenen Ionen in Richtung der Spitze mit größerer Dichte zusammengehalten werden, wodurch bei hinreichendem Gefälle leicht neue Ionisation eintreten kann. Die Aenderung der vorhandenen Stromstärke ist in solchem Falle bei Hinzutreten des Büschels nur gering.

6. Glimm- und Bogenentladungen an Spitzen. Die „stille Entladung“ mit oder ohne Büschel kann in eine andere Entladungsform übergehen, die der Glimmentladung im Geißlerschen Rohre vollkommen entspricht und die man zweckmäßig als „stille Entladung zweiter Ordnung“ bezeichnet. Erniedrigung des Gasdrucks führt sofort zum Einsetzen der anderen Form, aber auch bei Atmosphärendruck kann bei genügender Elektrizitätsentladung die Glimmentladung vorhanden sein. Das positive Licht zieht sich beim Uebergang in die Form der Glimmentladung auf einen schmalen Lichtfaden zusammen, der von der Anode bis zur Kathode reicht, ohne einen wesentlichen dunklen Zwischenraum mit kleiner Leitfähigkeit aufzuweisen und daher verhältnismäßig geringe Spannung benötigend. Es werden also bei diesem Uebergang Stellen kleiner Leitfähigkeit in der Entladungsbahn ausgeschaltet. Das Potentialgefälle bleibt an der negativen Spitze hierbei nahezu ungeändert, während bei positiver Spitze dasselbe außerordentlich abnimmt. Durch diese Abnahme wird eben bewirkt, daß die Glimmentladung mit viel geringerer Spannung zustande kommt. Es ist ja auch das Leitvermögen des Gases an der positiven Spitze durch Zusammendrängen der Ionen in die schmale Bahn der Glimmentladung ganz erheblich vermehrt worden, während bei der stillen Entladung erster Ordnung durch den Büschel die Ionen nach außen hin über einen Kegel mit einem Winkel von ca. 60° mit der Spitzenachse auseinandergetrieben werden. Bei negativer Spitze dehnt sich das Glimmlicht über einen etwas größeren Teil der Spitzenoberfläche aus, wodurch aber hinsichtlich der Ionisierung wenig verändert wird. Bei der Glimmentladung sinkt die zur Erzeugung notwendige Spannungsdifferenz der Elektronen mit zunehmender Stromstärke.

In der folgenden Tabelle sind nach einer Zusammenstellung von Warburg unter Benutzung von Messungen von Struchtey die Leitwerte der stillen Entladung 2. Ordnung mit denen 1. Ordnung verglichen, wobei unter Leitwert das Verhältnis Strom Spannung verstanden worden ist. Man sieht aus den Zahlen, daß dieses Verhältnis bei der Glimmentladung eine große Zunahme erfährt, die um so erheblicher wird, je größer der Druck ist. In der Tabelle bedeutet p den Druck, d die Elektrodendistanz, E die Spannung, J die Stromstärke.

	p	d	E	$J \cdot 10^6$	L	Lg/Ls
Glimmentladung	760	4,93	626	60000	9570	4830
negative Spitzenentladung	760	4,93	8600	170	1,98	
Glimmentladung	44,3	19	1110	951	85,7	198
negative Spitzenentladung	42,0	19	1250	5,4	0,432	
Glimmentladung	37,5	19	1090	1100	101	59
negative Spitzenentladung	37,0	19	1250	21,4	1,71	
Glimmentladung	12,5	19	830	2860	344	1590 bis 634
positive Spitzenentladung	15,5	19	1250	2,70	0,716	
	9	19	1250	6,79	0,543	

Ein ganz ähnlicher Fall tritt bei weiterer Erhöhung der Stromstärke ein. Es bildet sich dann an der Spitze eine dem Lichtbogen ähnliche Entladungsform („stille Entladung dritter Ordnung") aus, abermals gekennzeichnet durch eine Aenderung des Leitwertes. Letzterer erfährt wiederum ein Wachstum dadurch, daß neue Stellen schlechten Leitvermögens durch vermehrte Ionenbildung, vielleicht durch höhere Temperatur oder stärkere Lichtemission beeinflußt, ausgeschaltet werden.

7. Chemische Wirkung der stillen Entladung. 7a) Ozonbildung bei der Spitzenentladung. Von den an Spitzen möglichen Entladungsformen der Elektrizität besitzt die „stille Entladung erster Ordnung" eine besonders ausgeprägte chemische Wirkung, die sich dahin charakterisieren läßt, daß in dem beeinflußten Gase eine Zunahme der freien Energie erfolgt; sie wirkt derartig, als ob das durchsetzte Gas plötzlich auf hohe Temperatur gebracht würde. Daher bildet der Strom in Sauerstoff und in Luft das Ozon, dessen Konzentration im thermischen Dissoziationsgleichgewicht für Zimmertemperatur sehr klein ist; er zersetzt das Ammoniak und die Kohlensäure. Es zeigt sich aber, daß der Strom im durchsetzten Gase ebenfalls die umgekehrte Wirkung hervorbringen kann, indem er auf die Zersetzungsprodukte einwirkt und diese zerstört. So bildet die Spitzenentladung nicht nur Ozon, sondern zerstört es auch und daher kann man mit dieser Entladung kein Ozon von beliebiger Konzentration erzeugen, wenn man ein Sauerstoff-Ozongemisch ruhend der Entladung beliebig lange aussetzt. Es stellt sich hierbei ein Gleichgewichtszustand her, bei welchem der Stromdurchgang ebensoviel Ozon nachbildet, wie er von dem vorhandenen zerstört. Dieser Zustand ist abhängig von der Temperatur des Gases, seiner Dichte und auch von der Entladungsform, d. h. verschieden bei negativer und positiver Spitze. Da also die Einwirkung der Entladung anzusehen ist als Resultante einer direkten und inversen Wirkung, so muß man, um die chemische Wirkung der stillen Entladung kennen zu lernen, beide Wirkungen voneinander getrennt untersuchen. Dieses gelingt durch starkes Vorbeiströmenlassen des Gases an der wirksamen Stelle, am Herd der Entladung, denn bei sehr großer Strömungsgeschwindigkeit erhält man praktisch die maximale Ausbeute des gewonnenen Ozons, ohne Zerstörung des Zersetzungsproduktes. Auch kann man auf diese Weise die ozonbildende Wirkung des Stromes unter verschiedenen Bedingungen, bei Wechsel von Druck, Temperatur und Feuchtigkeit untersuchen. Dabei gibt der an der Spitze herrschende elektrische Wind (siehe weiter unten) wirksame Unterstützung, indem er die gebildeten Produkte aus dem Bereich der zerstörenden Entladung herausbefördert. So erhält man für die chemische Wirkung der Spitzenentladung zwei Größen als charakteristisch: erstens die Stromausbeute A_0 für die Konzentration des Ozons gleich 0, zweitens die Neigung der Kurve, welche die Ausbeuten als Ordinaten, die Konzentrationen als Abszissen besitzt, d. h. die Aenderung der Ausbeute mit wachsender Konzentration.

Zunächst werde die ozonbildende Wirkung der Spitzenentladung betrachtet. Man kann für solche chemische Wirkung dieser Entladungsform den Satz aufstellen, daß dieselbe innerhalb der Entladungsbahn nur an den Stellen vorhanden ist, wo das Gas zum Leuchten kommt. Es ist danach zugleich klar, daß positive und negative Spitzenentladungen ganz verschiedene chemische Wirkungen haben müssen; man kann diese in der oben beschriebenen Anordnung der Elektroden getrennt voneinander untersuchen. Bei der negativ geladenen Spitze ist die Ausbildung des Lichtes von der Stromstärke und der Elektrodenbeschaffenheit abhängig, nicht hingegen von der Spannungsdifferenz zwischen Spitze und Platte. Aendert man den Abstand zwischen denselben, während die Stromstärke konstant gehalten wird, so erhält man, da das von der Entladung hervorgebrachte Leuchten sich nicht ändert, stets die gleichen Ausbeuten an Ozon. Bei kleinen Elektrodenabständen, wo der Büschel der negativen Spitzenentladung in kegelförmiger Gestalt mit schwachem roten Licht bis zur Erdplatte reicht, wächst die Ausbeute. Das gleiche ist der Fall, wenn an einer negativ geladenen Spitze das Glimmlicht eine anormale Ausdehnung einnimmt; auch hierbei geht mit der Ausdehnung des Glimmlichtes die Ausbeute an Ozon stark in die Höhe. Man kann das Leuchten an der Spitze auch dadurch auf größere Flächen ausdehnen, daß man kleine Kugeln (2 mm Durchmesser) als Elektroden benutzt. Beispielsweise wächst beim Uebergang von der Spitze zu einer kleinen Kugel bei gleichbleibender Stromstärke die Ozonausbeute von 174 auf 419, ohne daß an der Anordnung im übrigen etwas verändert wird.

Die positive Spitzenentladung verhält sich ähnlich. Die positive Lichthaut an der Spitze ist in der Lichtentwickelung am wenigsten ausgezeichnet; sie liefert die kleinsten Ausbeuten ($A_0 = 61{,}8$); setzt bei gesteigerter Stromstärke an der Spannungselektrode der Büschel ein, vermehrt sich also das Licht der Entladung, so vermehrt sich ebenfalls die Ausbeute sehr stark ($A_0 = 180$); spaltet man endlich den Büschel weiter auf,

indem man eine kleine Kugel mit vorgeschalteter Funkenstrecke verwendet, so wächst die Ausbeute noch weiter ($A_0 = 598$); ferner verbreitert größere Spitzendicke die Ansatzstelle des Büschels, Vermehrung des Elektrodenabstandes verästelt ihn; in beiden Fällen steigt auch die Ausbeute an.

Die folgende Tabelle enthält eine Zusammenstellung der Ausbeuten und der benutzten Entladungsform. Hinzugefügt ist auch die Zahl der pro Grammäquivalent aufgewendeten Coulombs. Man sieht aus der großen Verschiedenheit der Zahlen für diese Größe, daß bei der chemischen Wirkung der Spitzenentladung an eine Gültigkeit des Faradayschen Gesetzes der Elektrolyse nicht zu denken ist; der Vorgang ist ja auch ein ganz anderer.

	A_0	Coulomb/gr-Aequivalente
Positive Lichthaut	618	1398
Negative Spitze	174	497
Positive Spitze, Büschel, 4 mm Abstand	313	276
Negative kleine Kugel	419	206
Positive kleine Kugel, Büschel, 1 cm Abstand	598	144
Ozonrohr, Glasapparat d = 3,7 mm	889	97
Ozonrohr, Metallapparat d = 4,66 mm	1033	84

Während ein elektrolytisch abgeschiedenes Grammäquivalent 96540 Coulombs verbraucht, ist die Zahl bei der stillen Entladung variabel und viel kleiner; bei den günstigsten Bedingungen in der weiter unten besprochenen Ozonröhre beträgt sie nur 84. Für die Zersetzung des Ammoniaks und der Kohlensäure ist sie in runder Zahl 2600.

7b) Auffassung der Wirkung. Aus dem oben Gesagten geht hervor, daß die stille Entladung erster Ordnung nur dann chemisch wirksam ist, wenn sie im durchströmten Gase Leuchten hervorruft. Man könnte dadurch auf die Vermutung kommen, daß das Licht der Entladung die chemische Wirkung hervorrufe, daß der Prozeß nur ein photochemischer sei. Allein man weiß, daß eine Ozonbildung aus Sauerstoff mit Hilfe des Lichtes nur dann eintritt, wenn das Licht in demselben stark absorbiert wird, was erst bei der Verwendung sehr kurzer Wellen des ultravioletten Lichtes der Fall ist. Wie Regener gezeigt hat, gehören verhältnismäßig große Intensitäten dieses Lichtes dazu, um merkliche Ozonmengen zu erzeugen. Lichtmengen, wie sie kaum von dem Lichte des Büschels ausgesandt werden. Hier sind es mit viel größerer Wahrscheinlichkeit die unter dem Einfluß der Feldstärke mit großer Geschwindigkeit sich bewegenden Elektronen, die im Gase Masse anlagern, zu Ionen werden und Leuchten dabei erzeugen, während sie gleichzeitig durch Stoß die Sauerstoffmoleküle zertrümmern und so durch Umlagerung der Atome Ozonbildung hervorrufen können; aber auch, auf eine gebildete Ozonmolekel stoßend, diese in Sauerstoff zurückverwandeln können. In dem dunklen Zwischenraum, zwischen dem an der negativen Spitze ansitzenden Büschel und der Erdplatte haben diese Ionen nicht mehr so große Geschwindigkeit, daß sie im Gase Leuchten erregen. Daher bleibt auch die Ozonbildung aus. Es scheint ganz allgemein zu gelten, daß bei der chemischen Wirkung durch Elektronen- oder Ionenstoß ein Leuchten auftritt; auch bei den aus einem Fenster der Lenardröhre austretenden Kathodenstrahlen, Elektronen von recht großer Geschwindigkeit, bemerkt man eine starke Ozonbildung, wenn der Sauerstoff unter dem Einfluß der Strahlen zum Leuchten angeregt wird.

7c) Die stille Entladung in Ozonröhren. Man kann die „stille Entladung" auch aus schwachgekrümmten und ebenen Flächen erhalten. Die Ozonröhre, welche von W. v. Siemens im Jahre 1857 angegeben wurde, zeigte zuerst die Möglichkeit. Sie bestand ursprünglich aus zwei konaxialen Glaszylindern, zwischen denen die Entladung überging, wenn die äußerste und innerste Zylinderwandung durch überklebtes Stanniol oder durch eine Flüssigkeit (Salzwasser) leitend gemacht und mit genügend hoher Wechselspannung geladen wurde. Später ersetzte man das innere Glasrohr durch ein Metallrohr, so daß die Entladung vom Metallzylinder auf die innere Glaswand der umgebenden Glasröhre übergeht. Die Figur 7 zeigt einen solchen Apparat, in welchem der Luftabstand zwischen Glas und Metallrohr, oder die Dicke des Entladungsraumes durch Benutzung mehrerer Metallzylinder variiert werden kann, was, wie unten gezeigt wird, für manche Zwecke der Ozonerzeugung Bedeutung hat. Daß eine Wechselspannung zum Betriebe des Apparates notwendig ist, ist leicht ersichtlich. Erhöht man an den äußeren Belegungen eine angelegte Gleichspannung, so wird auch im Raum zwischen den Zylindern Ladung entstehen, auf den Glasflächen sitzend, welche sich, wenn sie genügend angewachsen ist, im Gase einen Ausgleich schafft, und Ladung durch das-



Fig. 7. Ozonröhre (Metallapparat).

selbe hindurch auf die gegenüberliegende Wandung befördert. Dadurch entsteht aber eine Gegenkraft, welche ein weiteres Nachströmen der Ladung in der ursprünglichen Richtung zu verhindern sucht und schließlich dasselbe aufhebt. Läßt man nunmehr die Ladung der äußeren Belegung verschwinden, so gleicht sich auch im Entladungsraum die nunmehr freigewordene Ladung, welche die Gegenkraft hervorrief, durch das Gas hindurch aus, besonders dann, wenn man die äußere Ladung nicht nur auf Null bringt, sondern in ihrem Vorzeichen umkehrt. Daher ist für eine dauernde Erzeugung der stillen Entladung im Zwischenraum eine Wechselspannung erforderlich. Die Entladung selbst ist mit der besprochenen Spitzenentladung identisch. Es wechselt jedoch an einer Fläche die Formen der positiven und negativen Spitzenentladung zeitlich miteinander ab. Das Rohr erscheint im Entladungsraum mit gleichmäßigem, bläulichem Lichte erfüllt, das von den positiven Büscheln erzeugt wird, vorausgesetzt, daß das Gas Luft ist. Eine gleichförmige Verteilung des Lichtes im Apparat ist für ein ökonomisches Arbeiten desselben durchaus erforderlich. Wird derselbe an einer Stelle feucht und daher die Glaswand gut leitend, so konzentriert sich die Entladung auf diese Stelle mit nur wenigen Büscheln, welche die gesamte Strommenge des Apparates führen; die Stromdichte wird also in diesem Fall außerordentlich vergrößert und der Apparat liefert dann nur sehr wenig Ozon. Das negative Glimmlicht ist bei geringen Abständen nur sehr schwer zu erkennen.

Durch das Vorhandensein der Gegenkraft bei der Ueberführung der Ladung von einer Innenfläche zur anderen wirkt das Ozonrohr bei Wechselstrombetrieb wie ein in den Stromkreis eingeschalteter Kondensator, erzeugt also eine Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom. Das Ozonrohr würde auch ohne Vorhandensein der stillen Entladung einem Kondensator entsprechen, dessen Kapazität jedoch viel kleiner wäre. Mit dem Zustandekommen der Entladung wächst die Kapazität des Rohres sehr erheblich. Der Zuwachs ist abhängig von der Art des benutzten Rohres, dem inneren Elektrodenabstand, der Periodenzahl des Wechselstromes und endlich besonders von dem Leitungsvermögen des Gases in dem Entladungsraum. Ist das letztere sehr groß, so hat man den Fall, als rücke die Metallelektrode des Apparates bis zur Berührung an die Glaswand heran, was infolge der großen Nähe der entgegengesetzten, nur durch das Glas getrennten Ladungen eine große Kapazität des Apparates erzeugt. Ist das Leitvermögen sehr gering, so ist die Kapazität natürlich sehr viel kleiner. In beiden Fällen aber ist die Leistung des zum Apparate fließenden Wechselstromes gleich Null. Die Leistung ist auch hier durch die Formel gegeben: $L = E J \cos\varphi$ (E effektive Spannung, J effektiver Strom, $\cos\varphi$ Leistungsfaktor). Besitzt nun das Gas im Entladungsraum ein gewisses Leitungsvermögen, wie es der Fall ist, wenn die stille Entladung im Apparat erzeugt wird, so ist der auf den Apparat fließende Wechselstrom nicht mehr wie vorher nur ein Ladungsstrom, sondern leistet jetzt Arbeit. Dabei erreicht der Leistungsfaktor gewisse Werte, die außer vom Leitungsvermögen des Gases abhängig sind von der Art des Ozonrohres, der Dicke des Entladungsraumes und der Frequenz des benutzten Wechselstromes. Folgende Tabelle enthält einige Werte des Leistungsfaktors für Glas- und Metallapparate:

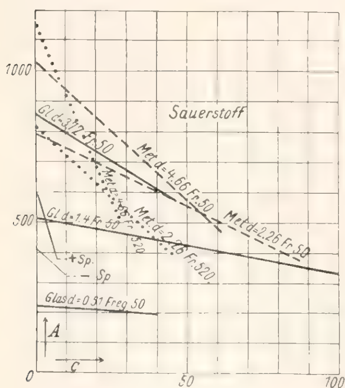
Dicke des Entladungsraums	Frequenz	Spannung (Volt)	Stromstärke $\times 10^3$ Amp	$\cos\varphi$
		Glasapparate		
0,51	50	8 050	0,132	0,185
1,40	50	10 080	0,102	0,314
1,40	50	16 900	0,193	0,243
3,72	50	17 500	0,159	0,415
		Metallapparate		
2,26	50	10 800	0,182	0,431
4,66	50	13 900	0,169	0,450
2,26	100	9 480	0,308	0,451
4,66	100	12 300	0,305	0,447
2,26	510	9 340	1,58	0,437
4,66	510	12 100	1,19	0,704

Um also eine bestimmte zur Verfügung stehende Spannung nach Möglichkeit zur Ozongewinnung mit Hilfe der stillen Entladung im Ozonrohr auszunutzen, ohne dessen Abmessungen allzu groß wählen zu müssen, wird man einen Apparat mit dem größten Leistungsfaktor zu wählen haben, also die Metallapparate mit erheblicher Dicke des Luftraumes bevorzugen, die man mit verhältnismäßig hoher Periodenzahl betreibt, da die höhere Frequenz einen günstigen Leistungsfaktor hervorruft. So wächst derselbe bei einem Abstand von 2,26 mm von 0,431 auf 0,537, wenn man von 50 Perioden auf 510 übergeht. Gleichzeitig wächst bei höherer Frequenz, wenn die Spannung am Rohr konstant gehalten wird, die Stromdichte im Apparat und damit seine Belastungsfähigkeit. Man kann [illegible] mit einem kleinen Ozonapparat ebensoviel

Ozon liefern wie mit einem großen, wenn bei dem kleinen Apparat die Frequenz entsprechend höher gewählt wird. Einen Nachteil hat allerdings für die Ozongewinnung die durch die Erhöhung der Frequenz ermöglichte Belastungsfähigkeit des Apparates: die Ausbeute an Ozon ist nur günstig bei verhältnismäßig kleinen Konzentrationen des letzteren, bei höherer Konzentration wird die Ausbeute viel schlechter als bei Verwendung kleiner Stromdichte.

7d) Ozonzerstörende Wirkung der Entladung. Aenderung der Ausbeute mit der Konzentration. Wie schon erwähnt wurde, setzt sich die chemische Wirkung der stillen Entladung erster Art aus zwei Einzelwirkungen zusammen, der ozonbildenden und der zerstörenden. Bleibt man bei dem Beispiel des Ozons, so erkennt man das Vorhandensein der zerstörenden Wirkung der Entladung, wenn man das zu ozonisierende Gas allmählich mit geringer werdender Geschwindigkeit am Entladungsherd vorübertreibt. In diesem Fall kann eine gebildete Ozonmolekel durch Auftreffen eines Elektrons wieder zerstört werden. Man erhält zwar bei dem langsameren Gasstrom eine größere Konzentration des Ozons, da aber manche der schon gebildeten Ozonmoleküle wieder zerfallen sind, wird die Ausbeute hierbei geringer. Ein Urteil über die Größe der ozonzerstörenden Wirkung der stillen Entladung erhält man durch graphisches Auftragen der Ausbeute als Funktion der Konzentration des Ozons. Es zeigt sich, daß die Neigung einer solchen Kurve um so größer wird, je größer der leuchtende Weg der Entladung im Gase ist; bei positivem Büschel ist diese also bedeutend größer, als beim kathodischen Glimmlicht. Es ist zwar beim positiven Büschel auch die ozonbildende Wirkung größer, jedoch wächst die zerstörende Wirkung sehr viel schneller als die erstere.

In der Figur 8 ist für eine positive und eine negative Spitze die Neigung der A—c-Kurve angegeben (A Ausbeute, c Konzentration). Für nicht zu große Konzentrationen kann man eine lineare Beziehung zwischen der Ausbeute und der Konzentration annehmen, so daß $A_c = A_0 - \beta c$ wird. In der Figur 8 bedeutet Met Metallapparat, Gl Glasapparat, d Abstand der inneren Elektroden, Entladungsraumdicke, Sp Spitze, F Frequenz. Hierdurch ist auch das Verhalten der Ozonröhre hinsichtlich ihrer Ausbeute bei verschiedenen Konzentrationen verständlich. Die Ausbildung des leuchtenden Teiles an der negativen Elektrode erstreckt sich hier nur auf einen sehr kleinen Raum, ist also praktisch von der Dicke des Entladungsraumes unabhängig. Daher zeigen Apparate mit kleiner Dicke des Entladungsraumes zwar kleine Nullausbeuten, da kein langer positiver Büschel in ihnen vorhanden ist, aber auch andererseits eine kleine Neigung zur Ozonzerstörung, so daß man mit solchen Apparaten zu größeren Konzentrationen mit noch guter Ausbeute gelangen kann. Eine Vermehrung der Dicke des Entladungsraumes hat andererseits ein Wachsen des positiven Büschels zur Folge. Damit steigt die Ausbeute für geringe Konzentrationen allmählich an, aber die Neigung der A—c-Kurve wird jetzt beträchtlich und man bekommt keine gute Ausbeute mehr bei höherer Konzentration. Erhöhung der Frequenz treibt die Ausbeute für kleine Konzentrationen in die Höhe, vermehrt aber die Kurvenneigung sehr beträchtlich, so daß man für die praktisch mit der Erhöhung der Frequenz des Wechselstromes nicht zu hoch gehen darf, sondern sich mit 500 Perioden pro Sekunde begnügen muß. Für atmosphärische Luft liegen die Verhältnisse ähnlich. Die nachfolgende Tabelle enthält einige Zusammenstellungen der Ausbeuten und



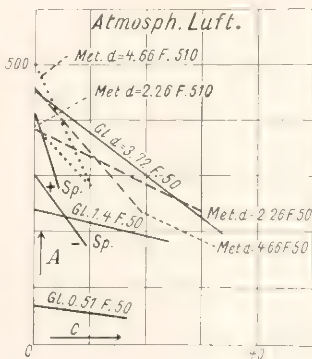


Fig. 8.

andere wichtige Größen für Ozonapparate. B bedeutet darin die technische Ausbeute, d. h. Gramm O_3/pro Kilowattstunde, der Index bei B bezieht sich auf die Konzentration (Gramm pro Kubikmeter).

d	i	Ea	p	Temp.	Grenzen e	A_0	β	B_0	βB	B_4	B_{10}	cos φ
					Glasapparate							
					Frequenz 50							
					Sauerstoff							
0,51	0,146	—	762	19,6	18—40	228	0,73	—	—	—	—	—
1,4	—	—	768	20	29—10,6	516	1,79	—	—	—	—	
3,72	0,134	—	766	24	36—45	857	6,04	—	—	—	—	
1,4	0,134	12 100	761	21,2	16—75	536	1,83	188	0,86	—		0,248
3,72	0,085	11 500	752	22,6	14—64	889	6,18	153	1,14	—		0,524
					Atmosphärische Luft							
0,51	0,182	8 050	767	21	4—17	65,7	0,90	45,5	0,72	41,9	38,3	0,185
1,4	0,193	16 900	763	21,4	9—24	2,38	2,01	56,8	0,45	55,1	52,3	0,243
3,72	0,160	17 500	762	21,7	15—34	4,51	7,22	60,1	0,90	56,1	51,1	0,415
					Metallapparate							
					Sauerstoff							
					Frequenz 50							
2,26	0,182	—	752	19,8	23—88	796	4,83	—	—	—	—	—
4,66	0,187		755	19,1	20—58	1033	9,25	—		—	—	
					Frequenz 520							
2,26	1,26	8 160	758	22	34—44	1151	9,25	164	1,67	—	—	0,568
4,66	1,57	11 900	755	18,5	20—30	819	22,9	148	2,93	—		0,632
					Atmosphärische Luft							
					Frequenz 50							
2,26	0,182	10 800	763	21,2	8—29	383	4,73	82,6	1,04	78,4	72,2	0,431
4,66	0,169	13 900	763	20,8	12—20	456	11,3	68,4	1,51	62,4	53,3	0,450
					Frequenz 100							
2,26	0,308	9 480	765	21	10—16	357	3,46	85,2	0,95	81,4	75,7	0,451
4,66	0,280	12 300	765	20,7	9,5—12	426	12,7	69,0	1,50	63,0	54	0,447
					Frequenz 510							
2,26	1,58	9 340	765	18,2	5,8—11	398	10,6	71,9	1,48	66,0	57,1	0,537
4,66	1,19	12 100	755	18,5	7,2—10,6	500	22,0	74,7	4,17	58,0	33,0	0,704

7e) **Stickstoffoxydation bei der stillen Entladung.** Eine weitere chemische Wirkung der stillen Entladung auf die atmosphärische Luft ist eine teilweise Oxydation des Stickstoffs. In trockener Luft entsteht unter dem Einfluß der Entladung Salpetersäureanhydrid N_2O_5 und Stickstoffoxydul N_2O, erkennbar und quantitativ bestimmbar durch das Absorptionsspektrum im Ultrarot, wo N_2O bei 4,47 μ und N_2O_5 bei 5,81 μ eine starke Bande besitzt. Das Verhältnis der Partialdrucke von $\frac{N_2O_5}{O_3}$ wird im Mittel zu 0,019, von $\frac{N_2O}{O_3} = 0{,}024$ gefunden; doch schwankt dieses Verhältnis je nach den Bedingungen der Entladung und der Temperatur des Gases. Man kann aber auch eine stille Entladung ohne jede Ozonbildung herstellen, so daß sie nur NO_2 liefert. Setzt man nämlich dem von der Entladung durchsetzten Gase eine geringe Menge NO_2 (Stickstoffdioxyd) zu — die NO_2-Bildung von 1 ccm NO in 1500 ccm Luft ist ausreichend —, so wird jede Ozonbildung unterdrückt. In strömender Luft, welche der Spitzenentladung unterworfen ist, genügt es zumeist, von der Spitze einige Funken durch die Luft schlagen zu lassen, um die nötige NO_2-Menge zu erzeugen, welche die Ozonbildung unterdrückt. In diesem Falle liefert also der Apparat auch bei strömender Luft nur NO_2. Die Stromausbeute ist dabei von der gleichen Größenordnung wie bei der technischen Darstellung des NO im Lichtbogen; bei Anwendung kleiner positiver Kugeln erhält man 11 Liter NO bei 0° und 760 mm Druck pro Amperestunde. Die

technische Ausbeute (Menge NO_2/Kilowattstunde) ist aber viel geringer, da infolge der schlechten Leitung des Gases zur Ueberbrückung der Gasstrecke durch die Entladung eine recht hohe Spannung erforderlich ist.

Aus den Ozonrohren erhält man bei Verwendung trockener Luft außer den erwähnten Stickoxyden noch ein stark gefärbtes Gas mit bläulicher Farbe und starken Absorptionslinien im Rot, Gelb und Grün. Dasselbe entsteht bei Einwirkung des Ozons auf N_2O_5 bei Zimmertemperatur, findet also die Bedingung für sein Auftreten beim Durchgang der stillen Entladung durch trockene Luft. Das Gas ist vermutlich ein Stickoxyd mit hohem Sauerstoffgehalt. Es bildet in geringer Konzentration in Luft eingeleitet, die mit Wasserdampf gesättigt ist, einen sehr feinen, blau aussehenden Nebel, wodurch sein Charakter als Säureanhydrid wahrscheinlich wird. Andere Merkmale außer der Nebelbildung und dem Absorptionsspektrum kennt man von demselben bis jetzt jedoch nicht.

8. Ionenbeweglichkeit bei der Spitzenentladung. Der Strom i bei der Spitzenentladung war gegeben durch die Gleichung

$$i = k V \cdot (V - M).$$

k hängt ab von den Dimensionen der Spitze und Platte, aber auch von der Geschwindigkeit der Ionen im Gase; k entspricht also dem Leitvermögen, welches das Gas unter den betreffenden Umständen besitzt. Im allgemeinen ist die Geschwindigkeit der negativen Ionen im Gase größer als die der positiven. Es muß deshalb bei gleichem Spitzenpotential bei negativer Spitze ein stärkerer Strom zustande kommen, als bei positiver, was durch die Beobachtung bestätigt wird. Ferner wächst die Geschwindigkeit der Ionen mit abnehmendem Gasdruck, infolgedessen auch der Spitzenstrom. Von großer Bedeutung ist hierbei die Reinheit des durchsetzten Gases. Manche Gase, wie Stickstoff, Argon, wohl auch Helium, lassen zu, daß das an der Spitze beschleunigte Elektron einen verhältnismäßig großen Weg zurücklegt, bis seine Geschwindigkeit hauptsächlich durch Anlagerung von neutraler Masse aus dem Gase sich stark verringert hat; der Sauerstoff, Jod und andere Gase hingegen sind als Elektronenfänger bekannt, sie lassen das Elektron mit großer Geschwindigkeit nur sehr kurze Wegstrecken durchfliegen, vergrößern alsbald, als neutrale Masse hinzutretend, die Eigenmasse des Elektrons, wodurch seine Geschwindigkeit sehr bald sich vermindert. Erzeugt man die Spitzenentladung an negativen Spitzen in reinem Stickstoff, so findet man, wie Warburg gezeigt hat, für die negative Leitung im verunreinigten Gas einen fünfmal so großen Wert wie für die positive, während dieselbe in reinem Gase 20-mal so groß wird. Die Leitung bei positiver Spitze wird, da sich an den positiven Ionen keine neutrale Masse anlagert, durch kleine Verunreinigungen des Stickstoffs nicht beeinflußt, was auch der Versuch bestätigt. In besonders reinem Stickstoff fand Warburg bei negativem Spitzenpotential —3310 Volt den Strom 200-mal so stark wie bei dem positiven Spitzenpotential +2180, während in dem schwach sauerstoffhaltigen Gase bei dem negativen Spitzenpotential —4850 Volt der Strom nur viermal so stark war wie bei dem gleich hohen positiven. Warburg machte die Annahme, daß die Verstärkung des negativen Spitzenstromes gegenüber dem positiven auf die beschriebene Weise erfolge; der Beweis, daß die Ionenbeweglichkeit in reinem Stickstoff und Argon für negative Ionen tatsächlich sehr viel größer ist als für positive, ist von J. Franck erbracht worden, wodurch die obige Vorstellung eine große Stütze erfahren hat. Der letztere hat auch die Beweglichkeit der Ladungsträger bei der Spitzenentladung untersucht, unter Benutzung eines dünnen Drahtes und einer koaxialen Zylinderfläche als Elektroden; sie wurde gemessen durch Ablenkung der Ionen aus ihrer Bewegungsrichtung durch einen Luftstrom, dessen Stärke man regulieren konnte. Die gefundenen Werte für die Beweglichkeit liegen höher, als sie für Ionen anderer Herkunft bestimmt worden sind, was damit erklärt wurde, daß die Ionen der Spitzenentladung einen Teil des Weges noch als Elektron mit bedeutend größerer Geschwindigkeit zurücklegen. Feuchtigkeit setzte die Beweglichkeit herab.

Dieser letzte Einfluß macht sich auch bei der Ozonbildung in feuchter Luft durch die Spitzenentladung bemerkbar; nimmt man an, wie oben auseinandergesetzt wurde, daß die Ozonisierung durch den Stoß der Elektronen oder der Ionen erfolgt, so wird nach der Vorstellung der Massenanlagerung des Wasserdampfes an das fliegende Elektron der Einfluß des letzteren um so geringer sein, je kleiner die Entfernung von der Elektrode ist, in welcher das Gas bei der benutzten Entladungsform noch zum Leuchten kommt. In reinem Sauerstoff ist der Einfluß des Wasserdampfes kleiner als in Luft.

9. Der elektrische Wind. Da die Dichtigkeit der Elektrizität an einer geladenen Spitze eine sehr große ist, so kann an derselben bei genügend starker Ladung eine Ionisation des anliegenden Gases entstehen, wodurch die Spitzenladung in das Gas hinein befördert wird. Die gebildeten Ionen werden in das Gas bis zu einer bestimmten Entfernung fortgetrieben, verlieren ihre Geschwindigkeit immer mehr und bilden im Gase eine Ladung. Infolge der Bewegung der Ionen und der Massenanlagerung tritt in der nächsten Umgebung der Spitze ein elektrischer Wind auf,

der in der nächsten Umgebung derselben oft sehr stark ist, während er schon in geringer Entfernung von ihr an Stärke bedeutend verliert. Bringt man Rauch an die Spitze, so läßt sich damit die Luftbewegung des elektrischen Windes verfolgen. Durch die Wirkung des elektrischen Windes ist auch die Erscheinung des elektrischen Flugrades bedingt; dadurch daß die Luftteilchen von der Spitze sich stark fortbewegen, muß, zumal da die Teilchen geladen sind, eine starke Abstoßung der gleichnamigen Ladung der Spitze eintreten. Macht man also die Spitze beweglich, so folgt sie der abstoßenden Kraft. Das Flugrad stellt man mittels S-förmigen Bügels her, der in der Mitte mit einer konischen Vertiefung auf feiner Spitze gelagert ist. Lädt man die Vorrichtung durch Verbindung mit einem Pol einer Influenzmaschine, deren anderer Pol an Erde liegt, so tritt die Rotation sofort ein, wenn das Potential der Spitzen so hoch ist, daß die Ionisation an ihnen eintreten kann. Daß die Strömung des Gases in unmittelbarer Nähe der Spitzen sehr groß ist, kann man auch daraus erkennen, daß eine elektrisch geheizte gelbglühende Spitze beim Auftreten des elektrischen Windes sofort sich auf Rotglut abkühlt, selbst wenn sie aus einem ½ mm starken Draht gebildet wird. Hinsichtlich der Erzeugung des elektrischen Windes verhalten sich übrigens die vor der Spitze liegenden, elektrisch geladenen Gebiete nicht alle gleichwertig. Ist an der Spitze sichtbare Entladung vorhanden, so ist dadurch das vom Strome durchflossene Gas hinsichtlich seines Leitungsvermögens an verschiedenen Stellen verschieden, wodurch ebenfalls in seinem Inneren freie Ladungen auftreten. Die Träger derselben, die Gasmoleküle, werden nun mit einer Kraft, welche dem Quadrat der elektrischen Feldstärke proportional ist, in der Richtung abnehmenden Leitungsvermögens fortgetrieben. Somit kommt der elektrische Wind auch durch Ungleichheiten des Leitungsvermögens zustande, muß also bei der stillen Entladung infolge dieser Ursache sehr groß sein, da wir es mit großen Unterschieden desselben innerhalb der Entladungsbahn zu tun haben. Die wichtige Rolle des elektrischen Windes bei der chemischen Wirkung der Spitzenentladung ist nicht zu verkennen. Da die Stärke des Windes an der Spitze, also an der Stelle, wo am meisten Ozon gebildet wird, am größten ist, so werden die chemisch veränderten Gasteilchen mit großer Kraft von dieser Stelle fortgetrieben und können neuen, unveränderten Platz machen. Dadurch werden die fertigen Produkte der zerstörenden Wirkung der Entladung entzogen, und die Ausbeute wird viel größer, als ohne Vorhandensein des Windes.

Warburg hat in reinem Stickstoff bei der Spitzenentladung an negativer Spitze, die mit einer Stromstärke belastet war, daß der bläuliche Stern an ihr auftrat, einen leuchtenden elektrischen Wind beobachtet. Von dem leuchtenden Stern ging ein feiner Lichtpinsel aus, welcher bei symmetrischer Anordnung (die zweite Elektrode war ein zur Spitze koaxialer Platinzylinder) in Richtung der Achse verläuft, wenig Bewegung zeigt, und im Aussehen an den positiven Büschel erinnert. Durch ein erdabgeleitetes Drahtnetz bewegt sich der elektrische Wind hindurch. Im Dunkel leuchtet das Gas 1 bis 2 Sekunden nach. Das an der Spitze gleichnamig elektrisierte Gas wird durch die elektrische Kraft fortgetrieben, hat gleichzeitig eine chemische Veränderung erlitten und bildet diese auf dem Wege des fortströmenden Gases unter Nachleuchten zurück. Hört die treibende Kraft durch Aufhebung der Ladung der Spitze auf, so bleibt das Nachleuchten noch eine Zeitlang sichtbar. Nach neuen Untersuchungen von Strutt über die Bildung von aktivem Stickstoff unter dem Einfluß elektrischer Entladungen, erscheint es sehr wahrscheinlich, daß auch dieser elektrische Wind auf die Bildung des letzteren zurückzuführen ist. Die Mitführung der Ladung innerhalb dieses Windes war sehr klein, kleiner als 3,7% des Gesamtstromes. Es zeigte sich, daß bei Einführung von Natrium auf elektrolytischem Wege in das Entladungsgefäß das Nachleuchten verschwand und das Leuchten des elektrischen Windes schwächer wurde. Warburg schloß daraus, daß eine bestimmte kleine Menge von Sauerstoff zum Entstehen des starken Nachleuchtens nötig sei, obwohl sich das Minimumpotential durch die Behandlung mit Natrium nicht mehr geändert hatte. Ist die Bildung aktiven Stickstoffs Grund des Leuchtens, so kann dieser durch das elektrolytisch eingeführte Natrium zerstört werden.

10. Die Korona der Hochspannungsleitungen. Die hohen Wechselspannungen, welche die moderne Elektrotechnik zum Uebertragen von Energiemengen an die Freileitungen anlegt, sind geeignet, an diesen die stille Entladung hervorzurufen, die an den Drähten auf ihrer ganzen Länge auftretend einen Verlust darstellt, den man den „Koronaverlust“ nennt, indem man die an den Drähten vorhandenen Leuchterscheinungen als „Korona“ bezeichnet. Diese Korona ist dem Wesen nach nichts anderes als die stille Entladung, wie sie in den Ozonröhren auftritt, mit dem Unterschiede, daß die Länge der erzeugten positiven Büschel eine erhebliche werden kann. Betrachtet man zwei die Korona tragenden Drähte auf stroboskopische Weise, also derart,

daß man die unter Spannung befindlichen Drähte mit Hilfe einer rotierenden Scheibe nur in dem Moment sieht, in welchem die Spannung durch ihren Maximalwert hindurchgeht, so erkennt man abwechselnd am einen und am anderen Draht die Kennzeichen der positiven und negativen Spitzenentladung. Die positiven Büschel sitzen dabei in ganz gleichmäßiger Verteilung auf dem Drahte auf, während das negative Glimmlicht nur an einzelnen Stellen in gewissen Abständen zu sehen ist, sich also diejenigen Stellen aussucht, die durch Reinheit oder Schärfen für seine Entstehung günstig sind. Die Leitfähigkeit der umgebenden Luft ist für das Einsetzen des Koronalichtes von Bedeutung; ferner der Abstand der spannungsführenden Drähte sowie deren Radius. Nach neueren Messungen scheint das Einsetzen der Korona einen Potentialgradienten von 30 000 Volt/Zentimeter unabhängig vom Drahtradius zu erfordern, doch sind diese Messungen nicht sehr genau, da der Gradient nicht direkt beobachtet, sondern aus dem Drahtabstand errechnet worden ist, was wegen der in der Nähe des Drahtes stark ionisierten Luft zu erheblichen Fehlern führen kann. Ob zwischen zwei Drähten bei allmählicher Spannungserhöhung die Korona sich ausbildet oder ein Funkenübergang erfolgt, hängt davon ab, ob die von beiden Drähten ausgehende Ionisierung der Luft so weit in dem Zwischenraum zwischen den Drähten vordringt, daß keine ausgedehnten Gebiete schlechter Leitfähigkeit übrig bleiben. Falls sich solche Stellen von genügender Ausdehnung finden, erhält man die Korona. Bei geringen Abständen tritt alsbald bei Spannungserhöhung der Funke auf, da die von den positiven Büscheln stark ionisierte Luft ihre Leitfähigkeit eine Zeitlang behält und für die nachkommenden Entladungen schon eine leitende Brücke vorhanden ist. Bei größeren Abständen ist die Erzeugung einer solchen Brücke von genügender Leitfähigkeit viel schwieriger, da die positiven von den Drähten ausgesandten Büschel sich stark verästeln, wodurch die Leitfähigkeit in größerer Entfernung an und für sich viel kleiner bleibt und infolgedessen auch rascher auf kleine Werte wieder abfällt.

Literatur. **E. Warburg,** *Ueber Spitzenentladung. Annalen der Physik (mehrere Arbeiten).* — **J. Stark,** *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (mehrere Arbeiten, [illegible]).* — **M. Toepler,** *Annalen der Physik [illegible].* — **Warburg und Leithäuser,** *Annalen der Physik (mehrere Arbeiten).* — **Warburg,** *Ueber chemische Reaktionen. Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik, Bd. 6, Heft ..*

G. Leithäuser.

Spongien,

Poriferen, Schwämme.

Die Spongien sind die niederst stehenden, ausschließlich auf das Wasserleben angewiesenen mehrzelligen Tiere, die hauptsächlich im Meer, in verhältnismäßig wenigen Vertretern (Spongilliden) im süßen Wasser leben (vgl. den Artikel „Porifera“).

Sporozoa.

A. Allgemeiner Teil. 1. Verbreitung. 2. Sitz. 3. Gestalt und Bau. 4. Ernährung und Bewegung. 5. Vermehrung. 6. Entwickelung. B. Systematischer Teil. — System. I. Unterklasse: Telosporidia. 1. Gregarinida. 2. Coccidia. 3. Haemosporidia (siehe den Artikel „Flagellata“). II. Unterklasse: Cnidosporidia (Neosporidia). 4. Myxosporidia. 5. Mikrosporidia. 6. Actinomyxidia. 7. Sarkosporidia. — Abstammung und Verwandtschaft.

A. Allgemeiner Teil.

Als Sporozoen werden einzellige Organismen bezeichnet, welche ausschließlich parasitisch leben und die sämtlich in bezug auf ihre Fortpflanzung durch Bildung zahlreicher Nachkommen in Gestalt von Sporen eine große Uebereinstimmung aufweisen. Die Sporen sind in den meisten Fällen von einer widerstandsfähigen Schale umgeben. Wenn sie jedoch nicht in ein äußeres Medium gelangen, sondern einen Zwischenwirt, so kann die Sporenhülle auch fehlen. Der Inhalt der Spore teilt sich wiederum in Sporozoite. Mit dieser Fortpflanzung ist wahrscheinlich stets Befruchtung und Wirtswechsel verbunden. Außerdem besitzen die meisten Sporozoen noch eine ungeschlechtliche Vermehrung durch Teilung, durch die sie sich in ihrem Wirte ausbreiten und ihn mit zahlreichen Keimen verseuchen (Autoinfektion). Im allgemeinen sind die Sporozoen Zellschmarotzer, indem sie in eine einzelne Zelle ihres Wirtes eindringen, in der sie entweder nur in der Jugend oder auch später leben. Ihre Ernährung geschieht durch Aufnahme flüssiger Nahrung auf osmotischem Wege, so daß ihnen bestimmte Einrichtungen zur Aufnahme und Abgabe fester Nahrungsbestandteile (Mund- und Afteröffnung) fehlen. Besondere Vorrichtungen zur Fortbewegung sind im allgemeinen ebenfalls nicht vorhanden, wenn auch in der Jugend gelegentlich amöboide Bewegungen und Geißeln auftreten. Wirts- und Generationswechsel sind bei den Sporozoen weit verbreitet.

1. **Verbreitung.** Die Sporozoen sind im Tierreich weit verbreitete Parasiten. Sie kommen bei allen Tierklassen, sogar den Protozoen (Mikrosporidien in Gregarinen) vor. Bei einem Vertreter der Anthozoen, Epizoanthus glacialis, ist das Vorkommen einer Gregarine angegeben worden. Ihre Verbreitung unter den Anneliden, Arthropoden, Mollusken und Wirbeltieren ist außerordentlich groß. Mitunter bleibt kaum ein Vertreter dieser Gruppen von Parasiten verschont. Unter den Regenwürmern

gibt es selten ein Exemplar, das nicht mit Gregarinen infiziert wäre. Dasselbe gilt für die Larven des Mehlkäfers (Tenebrio molitor) oder für andere Insekten, in deren Darm zumeist zahlreiche Gregarinen vorkommen. Weichtiere, Molluskoideen und Tunicaten scheinen weniger von den Parasiten heimgesucht zu werden. Besonders bei den Echinodermen ist bislang nur eine geringe Anzahl von Sporozoen festgestellt worden. Niemals wurden sie in pflanzlichen Zellen oder Geweben gefunden.

Zumeist schmarotzt eine gewisse Sporozoenart nur bei wenigen, in naher Verwandtschaft stehenden Wirten und paßt sich dabei der Lebensweise und dem Entwickelungsgange derselben an, so daß es verständlich ist, warum die meisten Sporozoen nicht außerhalb der engbegrenzten Umgebung, der sie angepaßt sind, existieren können, mit Ausnahme der kurzen Periode ihres Entwickelungszyklus, wo ihre beschalten Sporen nach außen gelangen. Diese engbegrenzte Existenzfähigkeit erstreckt sich in den meisten Fällen sogar auf gewisse Organe oder Gewebe ihres Wirtes.

Bezüglich ihrer geographischen Verbreitung scheinen die Sporozoen, wie die meisten anderen Protozoen, Kosmopoliten zu sein, so daß sie auf der ganzen Erde, überall wo Tiere leben, vorkommen. Am meisten sind sie bisher infolge gründlicher Untersuchungsmethoden in Europa und Amerika gefunden worden. Es ist aber nicht anzunehmen, daß sie in anderen Erdteilen weniger verbreitet sein sollten.

Wie die Uebertragung auf andere Wirtstiere erfolgt, ist in den letzten Jahrzehnten für viele Sporozoen festgestellt worden. In erster Linie trifft dieses für die krankheitserregenden Schmarotzer zu. Bei den meisten Sporozoen sind die Sporen infolge ihrer starken Hülle sehr widerstandsfähig und können lange im entwickelungsfähigen Zustande verharren. Sie sind in den Exkrementen oder in verwesenden Tierresten vorhanden, mischen sich dem Erdboden oder dem Wasser bei und gelangen gelegentlich durch Verunreinigungen der Nahrung in neue Wirtstiere. Das Auftreten von starken Infektionen aller oder der meisten Wirtstiere an einem Orte findet auf diese Weise oftmals seine Erklärung. Es spielt demnach die Bodeninfektion bei der Uebertragung gewisser Sporozoen eine große Rolle. Eine andere Uebertragung, die besonders in neuerer Zeit für große Gruppen von Sporozoen festgestellt wurde, geschieht durch Zwischenwirte. In erster Linie sind es blutsaugende Insekten und Arachnoideen, die als Ueberträger in Frage kommen.

Viele Sporozoen scheinen harmlose Gäste und ohne jede pathologische Bedeutung zu sein; andere verursachen jedoch schwere Krankheiten und Seuchen, die oftmals den Tod ihrer Wirte herbeiführen können. Die Malaria erfordert jährlich zahlreiche Opfer unter den Menschen. Die Myxosporidienkrankheiten unserer Fische bringen ganze Fischzuchten zum Aussterben und die Pebrinekrankheit der Seidenraupe hätte in der Mitte des vorigen Jahrhunderts beinahe die gesamte Seidenindustrie Südfrankreichs vernichtet.

2. Sitz. Sämtliche Organe und Gewebe des tierischen Körpers können von Sporozoen befallen werden. Es wird natürlich zumeist der Darmkanal mit seinen Anhangsgebilden in Mitleidenschaft gezogen. Ein sehr beliebter Aufenthaltsort der Schmarotzer ist die Leibeshöhle vieler Tiere, aber auch das Blutgefäßsystem, die Muskulatur und das Nervensystem werden von ihnen befallen.

Während eines Entwickelungsabschnittes ihres Lebens scheinen die meisten Sporozoen Zellschmarotzer zu sein. Die meisten sind es nur in der Jugend, viele jedoch für die längste Zeit ihres Lebens und andere, die im ausgewachsenen Zustande die Wirtszelle verlassen und nach kurzer Zeit eines freien Lebens eine neue Zelle aufsuchen, um dort ihre Entwickelung zu beenden. Vor allem sind es Epithel-, Muskel-, Nerven- und Blutzellen, in denen die Parasiten einen Teil ihres Lebens verbringen. Gelegentlich kommen sie auch im Kern der Zelle vor (z B. eine Coccidie des Maulwurfdarmes, Cyclospora caryolytica). Diese Fähigkeit der Sporozoen, vermittels beweglicher Keime in die Zellen ihrer Wirte einzudringen, ist für das Verständnis der ganzen Klasse von großer Bedeutung. Solange diese beweglichen Fortpflanzungskörper, die Sporozoiten, in festen Hüllen (Sporen) eingeschlossen sind, sind die überaus zarten Protoplasmakeime genügend gegen die Schädigungen der Außenwelt geschützt. Sobald sie aber diese Hüllen verlassen, finden und suchen sie zu ihrem Schutz und zu ihrer Ernährung besonders günstige Existenzbedingungen innerhalb der Zellen des von ihnen befallenden Wirtes, wodurch wohl dieser durchgehende Zellparasitismus der Sporozoen eine gewisse Erklärung findet.

Nach Abschluß ihres intrazellulären Entwickelungsganges schmarotzen die Sporozoen gewöhnlich in den Organen oder Geweben ihres Wirtes weiter, bis ihre Cysten oder Sporen zur Neuinfektion den Körper desselben verlassen. Je nach der Menge der zur Entwickelung kommenden Keime und der durch sie zerstörten Zellen (z. B. im Darmkanal und seinen Anhangsgebilden oder im Blutgefäßsystem und der Muskulatur) können sie krankheitserregend wirken und eine große pathogene Bedeutung erlangen (Coccidiose, Malaria, Myxosporidienseuche der Fische, Pebrine usw.). Wohin die Parasiten geraten, nachdem sie die ihnen bislang zum Aufenthalt dienende Zelle verlassen haben, hängt teilweise von dem Organ ab, in dessen Zellen sie schmarotzen. So werden Formen, die in ihrer Jugend die Zellen des Darmes oder seiner Anhangsorgane bewohnen, nach ihrer Auswanderung auch dort zu finden sein. Diejenigen Parasiten, welche in Blutkörperchen schmarotzen, findet man auch zumeist im ausgewachsenen Zustande im Blutgefäßsystem. Andere Formen, wie z. B. die meisten Myxosporidien, dehnen ihr Verbreitungsgebiet bedeutend weiter aus und durchseuchen oftmals den ganzen Körper des Wirtstieres. Manche Parasiten liegen in festen Cysten, andere infiltrieren ganz unregelmäßig das umliegende Gewebe. Viele durchwandern den ganzen Körper des Wirtstieres, durchdringen z. B. die Darmzellen und gelangen in die Leibeshöhle, um schließlich durch die Speicheldrüsen wieder nach außen in einen neuen Wirt gebracht zu werden, nachdem sie einen großen Teil ihres Entwicke-

lungszyklus auf ihrer Wanderung vollendet haben.

In den meisten Fällen wird die befallene Zelle durch den Parasiten zugrunde gerichtet und zwar erstens durch fortdauernde Entziehung von Nahrungsstoffen und weiterhin infolge der Größenzunahme des Schmarotzers. Wird auf diese Weise die befallene Zelle mit der Zeit funktionslos gemacht und zum Absterben gebracht, so macht das bei einer schwachen Infektion nichts aus. Sind die Parasiten aber sehr zahlreich, so können enorme Mengen von Zellen vernichtet und dadurch das ganze Organ funktionslos werden.

Ueberschwemmen Parasiten plötzlich und in großer Menge einen Organismus (Autoinfektion), so können schwere Krankheitserscheinungen auftreten, die einer Infektionskrankheit außerordentlich ähnlich sind (Coccidiose, Malaria usw.). Erfolgt jedoch die Zunahme der Parasitenzahl allmählich, so können wohl starke Veränderungen der Gewebe und Organe des Wirtes herbeigeführt werden (z. B. bei den meisten Myxosporidienseuchen der Fische), bei denen aber trotzdem der Wirt noch längere Zeit am Leben bleiben kann, obwohl oftmals die Hälfte seines Körpergewichtes aus Geschwulstmassen und Sporen besteht.

3. **Gestalt und Bau.** Die Gestalt der Sporozoen ist sehr verschieden. Auch was ihre Größenverhältnisse anbetrifft, machen sich die weitgehendsten Unterschiede bemerkbar. Es gibt Formen, die mit unbewaffnetem Auge sichtbar sind, z. B. die wurmförmige Gregarine Porospora gigantea im Darm des Hummers, die bis 1 cm und darüber lang werden kann, und andererseits Vertreter, die so klein sind, daß sie in den Kernen der von ihnen befallenen Zellen reichlich Platz finden. In der Regel sind jedoch die meisten Sporozoen mikroskopisch kleine Organismen. Was die Gestalt der Schmarotzer anbetrifft, so kann sie veränderlich oder formbeständig sein. Im ersteren Falle besitzen die Tiere ein rhizopodenähnliches Aussehen (Cnidosporidien) und vermögen Pseudopodien der verschiedensten Form auszusenden. Man hat wegen dieser großen Aehnlichkeit die Myxosporidien und mit ihnen die Sarkosporidien von Rhizopodenstammformen abgeleitet und in der Tat können diese Gruppen als parasitär gewordene Rhizopoden angesehen werden. Die andere große Abteilung der Sporozoen, die Telosporidia, scheint näher mit den Flagellaten verwandt zu sein. Wenn wir aber bedenken, welche nahen verwandtschaftlichen Beziehungen zwischen Rhizopoden und Flagellaten bestehen, so ist die Möglichkeit nicht ausgeschlossen, daß alle Sporozoen als Abkömmlinge von rhizopodenähnlichen Vorfahren zu betrachten sind, die durch den Parasitismus entsprechend verändert wurden (vgl. den Schluß dieses Artikels).

Unter den Telosporidia sind die meisten Vertreter formbeständig, d. h. sie entbehren im ausgewachsenen Zustande der amöboiden Veränderlichkeit. Sie sind entweder oval, sphärisch oder wurmförmig. Speziell in der Gruppe der Gregarinarien finden wir oftmals Vertreter von fadenförmiger, abgeplatteter Gestalt, die an Rundwürmer erinnern. Durch Bildung von Scheidewänden können in manchen Gruppen diese wurmförmigen Gebilde in einen kleineren vorderen und einen größeren hinteren, kernhaltigen Teil, Protomerit und Deutomerit, zerfallen (Polycystideen). Zumeist kommt dazu noch ein Epimerit, eine Einrichtung, die mit der eigentümlichen Art des Parasitismus der Gregarinen im Zusammenhang steht. In ihrer Jugend stecken die Gregarinen teilweise mit ihrem vorderen Körperende oder auch vollständig eingeschlossen in einer Wirtszelle. Sobald sie an Größe zunehmen und der Zellraum keinen genügenden Platz für das weitere Wachstum bietet, rücken die jungen Keime aus der Zelle heraus. Die meisten bleiben aber dann noch für längere Zeit mit ihrer Wirtszelle vermittels eines Fortsatzes des Protomerits im Zusammenhang. Dieses Gebilde ist der erwähnte Epimerit, der in der Hauptsache zur Verankerung, vielleicht aber auch als Hilfsmittel zur Ernährung dient und zumeist mit kutikularen Anhängen, Fäden oder Widerhaken versehen ist. Er geht verloren, wenn die Gregarine den Zusammenhang mit der Wirtszelle aufgibt und zur Encystierung schreitet.

Der Körper der Sporozoen besteht aus Ektoplasma, Entoplasma und Kern. Sehr deutlich sind die plasmatischen Schichten bei den Gregarinen ausgebildet, bei denen ein helles, körnchenfreies Ektoplasma scharf von dem trüb- und bisweilen grobkörnigen Entoplasma gesondert ist. Ersteres wird zumeist von einer derben, doppelt konturierten Pellicula überzogen, die aber, da ein Cytostom fehlt, durch feine Längsfurchen, von einem nach dem anderen Körperpol über das ganze Tier hinweglaufend, für flüssige Nahrung passierbar sein muß. Unter der Pellicula, dem Ektoplasma angehörend, kann eine Querstreifung verlaufen, die durch zirkulär angeordnete Muskelfibrillen, sogenannte Myoneme, hervorgerufen wird. Sie kann durch ihre Kontraktionen gewisse, sehr auffällige Körperbewegungen mancher Gregarinen herbeiführen. Das Entoplasma, das den zumeist verhältnismäßig großen Kern enthält, hebt sich durch seine körnige Beschaffenheit deutlich vom Ektoplasma ab. Die reichlichen Granulationen, die es enthält und die oftmals den Kern völlig verdecken, bestehen in erster Linie aus Nahrungsstoffen (Zooamylum). Fettkugeln, Volutin, Eiweißkristalle, chromatische Körnchen (Chromidien) usw. kommen oftmals als weitere Einschlüsse zur Beobachtung. Kontraktile Vakuolen, die bei den übrigen Protozoen zumeist regelmäßig vertreten sind, sind bei den Sporozoen bislang nicht beobachtet.

4. **Ernährung und Bewegung.** Da die Sporozoen ausschließlich Parasiten sind und von den Nahrungssäften ihrer Wirte leben, so sind ihre physiologischen Lebensäußerungen naturgemäß sehr einfach. Die Ernährung erfolgt nicht durch Aufnahme fester Nahrung, sondern die Parasiten nehmen in den meisten Fällen mit ihrer ganzen Körperoberfläche aus dem umgebenden Medium flüssige Nahrungsstoffe auf. Aus diesem Grunde fehlen ihnen besondere Vorrichtungen wie ein Cytostom oder eine Cytopyge, allerdings mit scheinbar einer Ausnahme, Stomatophora coronata (Hesse), bei der von Drzewiecki Mundöffnung, Peristom und After beschrieben worden sind. Diese interessante Gregarine lebt in einem in Afrika vorkommenden Wurm (Pheremita sp.), dessen Spermatozoen, in Nahrungsvakuolen eingeschlossen, im Inneren der Gregarine lagen.

Die Aufnahme der Nährflüssigkeit muß entweder durch Diffusion oder durch feinste Poren der Pellicula erfolgen. Bei den Gregarinen scheint die Pellicula besonders in den Längsfurchen für die Aufnahme flüssiger Nahrung durchlässig zu sein. In vielen Fällen erfolgt höchstwahrscheinlich die Aufnahme nicht nur ausschließlich durch die gesamte Körperoberfläche, sondern vor allen Dingen an der Stelle, wo die Gregarine mit der Wirtszelle durch den Epimerit verbunden ist. Nur unter dieser Voraussetzung kann man die wurzelförmigen, verästelten Bildungen mancher Epimerite verstehen, die sich tief in die Zelle hineinerstrecken und vielfach auch den Kern umspinnen. Auf den innerhalb der Zelle verweilenden Stadien müssen naturgemäß die infizierten Zellen das Nährmaterial liefern. Wenn die Parasiten die Zellen verlassen, so kann die Nahrungsaufnahme im ganzen Wirtskörper stattfinden, gleich, ob der Schmarotzer im Darmkanal, in den Geweben, im Blute oder an einer anderen Stelle weiterlebt. Erst wenn die Tiere zur Encystierung schreiten, hört die Nahrungsaufnahme bei vielen auf, andere wachsen auch während der Sporenbildung weiter.

Die Ernährungsweise der Coccidien, Myxosporidien und Sarkosporidien ist bis jetzt wenig untersucht. Sie muß mangels einer Mundöffnung, wie allgemein bei den übrigen Gruppen der Sporozoen, auf osmotischem Wege stattfinden. Die Kernparasiten, die z. B. unter den Coccidien mehrfach vertreten sind, müssen den Kernen der Wirtszelle ihre Nahrung entnehmen. Diese Schmarotzer sind übrigens nicht streng an den Aufenthalt im Kern gebunden, sondern können auch im Plasma der Zelle ihr Dasein fristen (z. B. Cyclospora caryolytica, Stenophora usw.). Interessant sind die Ernährungsbeziehungen, die der Kern der Coccidie Caryotropha Mesnilii zu dem Kern der Wirtszelle besitzt (Siedlecki). Der Parasit umfaßt den Kern der hypertrophischen Zelle und es läuft von ihm aus ein spaltförmiger Kanal bis an den Parasitenkern. Die Arbeit des Kernes der Wirtszelle scheint auf diese Weise auf direktem Wege vom Parasiten ausgenutzt zu werden. Ob die Zell- und Gewebsparasiten durch von ihnen ausgeschiedene Substanzen eine Art Vorverdauung auf ihre Umgebung ausüben, darüber liegen bislang keine Untersuchungen vor. Ebenfalls wissen wir nicht, ob die Parasiten nur gewisse Stoffbestandteile den befallenen Zellen und Geweben entnehmen oder wahllos den ganzen Inhalt aufbrauchen. Für gewisse Fälle scheint letzteres wahrscheinlich zu sein.

Den spezielleren Vorgang der Diffusion der Nahrungsflüssigkeit hat man bislang nicht festzustellen vermocht. Ebenfalls war es nicht möglich, die Entfernung unbrauchbarer Stoffe, sei es in flüssiger oder fester Form, aus dem Körper zu beobachten. Wie schon erwähnt, sind kontraktile Vakuolen und Cytopygen bis auf den einen angegebenen Fall bei Stomatophora coronata nicht vorhanden. Trotzdem muß ein Stoffwechsel mit dem umgebenden Medium stattfinden. Selbst in den Cysten kann dieser nicht völlig unterbrochen sein, denn wenn z. B. die Sauerstoffzufuhr zu solchen Cysten, die sich außerhalb der Wirtstiere entwickeln, verhindert wird, so kommt die Vermehrung in der Cyste zum Stillstand und der Inhalt geht allmählich zugrunde.

Körperausscheidungen in Form einer gallertigen Flüssigkeit sind von den Gregarinen näher bekannt geworden. Diese Schleimabsonderungen sind ziemlich stark. Sie bleiben als deutlich nachweisbare Kriechspuren in Form erstarrender Schleimfäden beim Vorwärtsgleiten der Gregarinen zurück.

Man kann bei den Sporozoen im allgemeinen vier Arten von Bewegungen unterscheiden: 1. peristaltische Bewegungen, 2. Krümmungen und Streckungen, 3. gleitende Vorwärtsbewegungen und 4. amöboide Bewegungen.

Die peristaltischen Bewegungen, die sehr lebhaft ausgeführt werden können, sind bei den Gregarinen in der Abteilung der Monocystideen häufig zu beobachten. Sie bestehen in keiner eigentlichen Fortbewegung, sondern die Gregarine bleibt trotz ihrer lebhaften Bewegung ungefähr an der Stelle liegen, wo sie sich befindet. Es gehen rhythmisch fortschreitende Kontraktionswellen von vorn nach hinten und umgekehrt verlaufend über das ganze Tier hinweg. Man kann deutlich beobachten, daß diese Wellen vom Ektoplasma erzeugt werden, während das körnchenreiche, leichtbewegliche Entoplasma in dem kontraktilen Ektoplasmaschlauch entsprechend verschoben wird.

Krümmungen und Streckungen des Körpers finden nicht nur bei den meisten Keimlingen (Sporozoiten) der Sporozoen statt, sondern auch bei ausgewachsenen Formen vieler Gregarinen (hauptsächlich Polycystideen und Hämogregarinen). Der Körper kann an einer beliebigen Stelle plötzlich umgeknickt und ebenso ruckartig wieder gestreckt werden.

Die gleitenden Vorwärtsbewegungen, die ohne merkliche Körperveränderung stattfinden und die an ähnliche Erscheinungen bei Diatomeen und Desmidiaceen erinnern, sind noch nicht befriedigend erklärt. Sie sind sehr gut an polycystiden Gregarinen zu beobachten und Schewiakoff nimmt an, daß durch die bereits erwähnten Längsspalten der Pellicula (vgl. Abschnitt 3) eine gewisse gallertige Substanz austritt, die sich am Hinterende der Gregarine in Form eines Konus ansammelt. Indem nun fortwährend neue Gallertmassen ausgeschieden werden, die in dem umgebenden Medium eine festere Beschaffenheit annehmen, kommt es zur Bildung eines Gallertstieles, durch den die Gregarine gleichsam passiv vorwärts geschoben wird. Zweifellos findet, wie durch zahlreiche Beobachtungen festgestellt wurde, die Ausbildung des angegebenen Gallertstieles statt. Ob dieser aber die Ursache und nicht nur eine Folgeerscheinung der Gleitbewegung ist, muß fraglich bleiben. Es scheint mehr das letztere der Fall zu sein, wenn wir bedenken, daß sich die betreffenden Gregarinen nicht nur vorwärts, sondern ebensogut rückwärts bewegen können, daß sie oftmals Bogen in ihrer Bewegung beschreiben und diese Bewegungen in der mannigfaltigsten Weise ändern können. Wie neuere Beobachtungen ergeben, scheint die von Schewiakoff festgestellte Gallertschicht bei manchen Gregarinen völlig zu fehlen (Sokolow).

Die amöboiden Bewegungen, die in typischer Weise bei den erwachsenen Formen der Myxosporidien, aber auch bei manchen Sporozoiten

vertreten sind, bestehen in der Bildung von Pseudopodien der mannigfaltigsten Art und rufen eine amöbenartige Fortbewegung dieser Sporozoen hervor.

Während von den erwachsenen, vegetativen Formen nur eine gewisse Anzahl Bewegungen auszuführen vermag, scheinen die jüngsten Entwickelungsstadien aller Sporozoen, die Sporozoiten oder Keimlinge, durchweg beweglich zu sein.

5. **Vermehrung.** Infolge ihrer parasitischen Lebensweise haben die Sporozoen die Eigenschaft, eine sehr zahlreiche Nachkommenschaft zu erzeugen. Diese Art der Fortpflanzung ist für die ganze Klasse charakteristisch und besteht in dem gleichzeitigen Zerfall der Protoplasmamasse des Muttertieres in zahlreiche, kernhaltige Teilstücke (Sporen).

Die Fortpflanzung erfolgt sowohl auf ungeschlechtlichem als auch auf geschlechtlichem Wege. Im ersten Falle kennen wir nicht nur Teilungen der erwachsenen, vegetativen Formen (Schizogregarinen, Aggregaten), deren Schizogonie man als agame oder progame Fortpflanzung bezeichnet hat, sondern in den meisten Fällen wächst der Parasit heran und zerfällt schließlich nach entsprechender Kernvermehrung durch multiple Teilung in zahlreiche sporozoitenähnliche Keime, die allgemein als Merozoiten oder Agameten bezeichnet werden (Coccidien, Hämosporidien usw.), die sich im Wirte zerstreuen und neue Infektionen (sogenannte Autoinfektionen) herbeiführen. Auf Grund dieses Vorganges findet eine Vermehrung des Parasiten in den Geweben und Organen des Wirtes statt, ohne daß die Keime nach außen gelangen. Das würde auch schon aus dem Grunde unmöglich sein, weil sie hüllenlos sind. Dieser Prozeß, der ebenfalls als Schizogonie oder multiplikative (auch progame) Fortpflanzung bezeichnet wird und der, wie gesagt, eine Erhöhung der Parasitenzahl in demselben Wirte hervorruft, kann unter Umständen bei mehrfacher Wiederholung eine starke Ueberschwemmung des infizierten Organismus mit Keimen herbeiführen und so der in geringerer Zahl vielleicht harmlose Parasit zu einem gefährlichen Krankheitserreger werden. Bei den echten Gregarinen (Eugregarinen) fehlt diese multiplikative Fortpflanzung der erwachsenen Formen und ist durch ein einmaliges starkes Wachstum der Tiere ersetzt.

Mit der multiplikativen Fortpflanzung wechselt eine geschlechtliche, propagative ab, die auch als metagame Entwickelung oder Sporogonie bezeichnet wird und die als Resultat die Bildung von Dauersporen bezweckt, welche nach außen gelangen, wenn kein Zwischenwirt vorhanden ist, und zur Uebertragung auf fremde Individuen dienen. Die propagative Fortpflanzung oder Sporogonie beginnt mit einer Befruchtung, die zumeist der Sporenbildung vorausgeht. Die Keime oder Gameten entwickeln sich entweder durch Teilung aus den encystierten erwachsenen Tieren, wie z. B. bei den Gregarinarien, oder die durch Schizogonie entstandenen Merozoiten oder Agameten wachsen zu Gameten heran (Coccidien, Hämosporidien). Sind die Gameten von gleicher Größe, so spricht man von Isogameten. Zumeist werden jedoch unbewegliche, mit Reservenährmaterial versehene Makrogameten von äußerst beweglichen Mikrogameten befruchtet. Diese verschiedenartig gestalteten Keime werden als Anisogameten bezeichnet. Der geschlechtliche Dimorphismus der Gameten kann lange Zeit vorbereitet werden und schon in vorausgehenden Generationen (Gametocyten) zum Ausdruck kommen. In derselben Weise wie zwischen Ei und Spermatozoon der Metazoen erfolgt die Kopulation zweier Gameten, nachdem in den meisten, genauer bekannt gewordenen Fällen der weibliche Gamet, wie das Ei der Metazoen, Reifeteilungen durchlaufen hat. Nach der Vereinigung der Gameten kommt es zur Bildung der Dauercyste (Oocyste oder Zygote), die nach außen gelangen soll. In der Zygote, wie sie in der neueren Literatur allgemein genannt wird, die sich durch eine widerstandsfähige Schale auszeichnet, entstehen durch metagame Teilungen die Sporen, die gleichfalls zumeist von einer festen Hülle umschlossen sind. In ihnen entstehen schließlich durch weitere Teilungen die Sporozoiten, die den Abschluß der Entwickelung bilden und zur Infektion neuer Wirte dienen. Gelangen die Sporen nicht ins Freie, sondern werden sie direkt in den Körper eines Zwischenwirtes aufgenommen, so entbehren sie der Sporenhülle (Hämosporidien). Bei allen die Befruchtung vorbereitenden oder ihr unmittelbar folgenden Teilungen bleiben Teile des Plasmakörpers unbenutzt zurück und bilden den sogenannten „Restkörper", in dem sich oft auch noch Kerne finden, die aber allmählich der Degeneration anheimfallen. Von diesem Typus der Vermehrung weichen die einzelnen Gruppen und Vertreter der Sporozoen vielfach ab. Besonders ist dieses bei den Cnidosporidien der Fall. Zum Teil mag es wohl bei dieser Gruppe daran liegen, daß unsere Kenntnisse über die Vermehrungsweise und besonders über ihre geschlechtlichen Verhältnisse noch sehr lückenhaft sind. Soviel steht jedoch auch bei ihnen fest, daß sie zur Neuinfektion Sporen und Sporozoite bilden. In den meisten, uns genauer bekannt gewordenen Fällen spielen sich die Fortpflanzungsverhältnisse der Sporozoen unter dem Bilde des Generations- und Wirtswechsels ab; sie stellen also eine echte Metagenese dar.

6. **Entwickelung.** Es lassen sich im allgemeinen drei Abschnitte im Lebenszyklus der Sporozoen unterscheiden, die freilich durch zahlreiche Uebergänge und Zwischenstufen miteinander verbunden sein können.

1. Stadium: Das Heranwachsen der jungen Keime zu ausgebildeten Sporozoen.

2. Stadium: Die Aufspeicherung von Nahrungsstoffen.

3. Stadium: Der Fortpflanzungszustand.

Das Heranwachsen der Keime zu ausgebildeten Sporozoen erfolgt, nachdem sich die Sporozoiten (Sichel- oder Amöboidkeime) in eine Wirtszelle eingebohrt haben oder mit einer solchen doch in Verbindung getreten sind. Die Keime sind beweglich und es scheint nicht ausgeschlossen zu sein, daß sie sämtlich in ihrer Jugend Zellschmarotzer sind, obwohl dieses für manche Gregarinen und für zahlreiche Cnidosporidien noch nicht sicher festgestellt ist. Sie wachsen im allgemeinen heran, bis sie ihre definitive Gestalt erreicht haben, obwohl manche ihrer Vertreter bereits in ihrer Jugend Fortpflanzungserscheinungen zeigen.

Sobald die Sporozoen dieses Stadium er-

reicht haben, treten sie in die zweite Epoche ihres Lebens ein. Es beginnt eine Aufspeicherung von Reservenährstoffen, wodurch sie in den meisten Fällen nicht nur an Größe zunehmen (Gregarinen), sondern sich auch das Entoplasma ihres Körpers mit reichlichen Granulationen erfüllt. Dies tritt besonders bei Gregarinen und Coccidien hervor.

Das dritte Stadium umfaßt die Vermehrung, die bereits vorstehend in ihren Grundzügen besprochen wurde und die in den einzelnen Gruppen der Sporozoen einen verschiedenen Verlauf nehmen kann. Sie umfaßt neben der ungeschlechtlichen Fortpflanzung außerdem noch einen sexuellen Prozeß, der wohl auch bei den Formen vorhanden ist, die daraufhin noch nicht genauer untersucht sind. Diese sexuelle Differenzierung, die bis jetzt bei den Gregarinen, Coccidien und Hämosporidien sicher, bei den Cnidosporidien nur vermutungsweise festgestellt wurde, ähnelt in ihren Einzelheiten in so auffälliger Weise den Verhältnissen bei den Metazoen, daß man nicht umhin kann, beide für übereinstimmende Vorgänge zu halten. Der schließliche Zerfall der Parasiten in zahlreiche Sprößlinge, die Sporulation, ist wohl als eine Anpassung an die parasitische Lebensweise zu betrachten.

Die zahlreichen Autoren, die sich seit Schaudinns klassischen Arbeiten mit der Protozoenentwickelung beschäftigten, haben eine Anzahl neuer Bezeichnungen für die einzelnen Stadien der Fortpflanzungserscheinungen geschaffen, die es sehr erschweren, sich in die betreffende umfangreiche Literatur einzuarbeiten. Doflein hat in seinem Lehrbuch der Protozoenkunde eine Tabelle dieser Terminologie zusammengestellt, die hier anschließend wiedergegeben sei. Wir werden uns in den nachfolgenden Ausführungen möglichst der von Doflein vorgeschlagenen Bezeichnungen bedienen.

Terminologie der Protozoenentwickelung (nach Doflein).

Schaudinn (1899, 1900) Lühe (1900)	Lang (1901)	Grassi (1902)	Hartmann Auffassung I (1903)	Doflein (1911)
Schizont	Monont	Monont	Agamont (agames Individuum)	das „Coccidium", die „Gregarine" usw.
Schizogonie	Monogonie	Monogonie	Agamogonie	Agamogonie
Merozoit	Gymnospore (monogonisch)	Sporozoit (monogonisch)	Agamet	Agamet
	Gametogene Mononten-generation		Geschlechtliche Individuen (= Gamonten) Gamogonie	Geschlechtliche Individuen (= Gamonten) progame Teilungen der Gamonten
Makrogamet	Makrogamet (Oogonium)	Makrospore	Makrogamet	Makrogamet
Mikrogametocyt	Antheridium	Antheridium	Mikrogametocyt	Mikrogametocyt
Mikrogamet	Mikrogamet	Mikrospore	Mikrogamet	Mikrogamet
(Oocyste) Kopula Sporont	Cystozygote Amphiont	Amphiont	Zygote	Zygote
Sporogonie	Amphigonie	Amphigonie	Metagame Teilungen	Metagame Teilungen der Zygote
Sporozoit	Gymnospore (amphigonisch)	Sporozoit (amphigonisch)	Sporozoit	Sporozoit
Schizont	Monont	Monont	Agamont	Agamont

B. Systematischer Teil.

Das System der Sporozoen.

Die zur Klasse der Sporozoen vereinigten Formen werden kaum als einheitlichen Ursprungs aufzufassen sein. Was wir von ihrer Lebensgeschichte bislang kennen gelernt haben, macht es immer wahrscheinlicher, daß in den beiden Unterklassen, in die wir die Sporozoen einteilen, zwei Tierstämme verschiedener Abstammung vereinigt sind. Während die Telosporidia, zu denen die Gregarinen, Coccidien und Hämosporidien zu rechnen sind, offenbar eine nähere Verwandtschaft zu den Flagellaten aufweisen, treten uns bei den Vertretern der anderen Hauptgruppe, den Neosporidien oder Cnidosporidien, wie sie neuerdings genannt werden, und zu denen die Myxosporidien, Mikrosporidien,

Actinomyxidien und Sarkosporidien als Ordnungen zu zählen sind, Eigenschaften entgegen, die eine nähere Verwandtschaft zu den Rhizopoden wahrscheinlich machen.

Trotzdem will es uns in Uebereinstimmung mit anderen Autoren nicht vorteilhaft erscheinen, die Klasse der Sporozoen im Sinne Hartmanns usw. aufzuteilen. Die Vertreter dieser Klasse stehen durch ihre charakteristische Fortpflanzungsweise in zu engem Zusammenhang, als daß man sie trennen könnte; ganz davon abgesehen, daß Rhizopoden und Flagellaten selbst aufs nächste verwandt sind. Wir werden am Schluß dieses Artikels noch näher auf diese Frage einzugehen haben.

Klasse: Sporozoa.

I. Unterklasse: Telosporidia.
- 1. Ordnung: Gregarinida.
- 2. „ Coccidia.
- 3. „ Haemosporidia (siehe den Artikel „Flagellata“).

II. Unterklasse: Cnidosporidia (= Neosporidia).
- 4. Ordnung: Myxosporidia.
- 5. „ Mikrosporidia.
- 6. „ Actinomyxidia.
- 7. „ Sarkosporidia.

I. Unterklasse: Telosporidia.

Einkernige Sporozoen, bei denen die Sporenbildung am Schluß der vegetativen Periode eintritt. Die Keimlinge sind zumeist in eine feste Sporenhülle eingeschlossen, mit Ausnahme der Hämosporidien, bei denen infolge ihrer besonderen Lebensweise in Zwischenwirten beschalte Fortpflanzungskörper zur Neuinfektion anderer Wirte überflüssig sind, da die Keime niemals ins Freie gelangen. Trotzdem rechnen wir die Hämosporidien zu der großen Abteilung der Telosporidia wegen der Analogie, welche der Generationswechsel der Malariaparasiten mit dem der Coccidien aufweist.

Die Entwickelung aller Vertreter dieser Unterklasse beginnt damit, daß ein junger Keim (Sporozoit) in eine Zelle oder in das Gewebe eines neu infizierten Wirtes eindringt, dort eine gewisse Wachstumsperiode durchläuft und nun entweder die Zelle verläßt oder auch noch während seiner Fortpflanzung in ihr verbleibt. Diese ist entweder anfangs ungeschlechtlich (multiplikative Fortpflanzung), oder es entwickeln sich direkt die Geschlechtsindividuen, die eine Befruchtung herbeiführen, als deren Resultat die Zygote entsteht, welche sich mit einer Cystenmembran umgibt. Die Befruchtung kann entweder isogam oder anisogam verlaufen. In der anfangs einkernigen Zygote finden mehrfache Kernteilungen statt; um jeden Kern sondert sich eine Plasmapartie ab, so daß der Cysteninhalt entweder unmittelbar, wie bei den Hämosporidien, in zahlreiche Sporozoiten zerfällt, oder aber die mit Kern versehene Plasmapartie sondert eine feste Hülle ab, wodurch eine widerstandsfähige Spore gebildet wird. In dieser Hülle entsteht durch weitere Teilungen von Kern und Plasma eine gewisse Anzahl von Keimen (Sporozoiten), die durch Uebertragung auf andere Wirte eine neue Generation zur Entwickelung bringen. Es ist bemerkenswert, daß bei allen Telosporidien nicht das ganze Muttertier in Fortpflanzungskörper zerfällt, sondern ein Teil desselben als Restkörper dem Untergange anheimfällt. Außerdem findet vor der Kopulation der Geschlechtstiere in allen genauer untersuchten Fällen eine Reduktion des Kernes der Gameten statt.

1. Ordnung: Gregarinida.

Da die Gregarinen die typischsten Vertreter der Sporozoen sind, so sollen sie an erster Stelle berücksichtigt werden. Sie kommen ausschließlich in Wirbellosen vor und leben vorwiegend im Darm ihrer Wirte, aber auch in deren Leibeshöhle und Samenblasen werden sie gefunden. In den Hoden und Ovarien wurden sie jedoch bislang noch nicht angetroffen. Eine eigentlich pathogene Bedeutung kommt ihnen nicht zu, sondern sie können höchstens durch ihre Menge schädlich wirken. Bemerkenswert ist ihre große Verbreitung bei nahezu allen Klassen der wirbellosen Tiere, ihr völliges Fehlen bei den gesamten Wirbeltieren und ihre reiche Formen- und Artenzahl, die uns in ihnen die höchstdifferenziertesten Sporozoen vermuten läßt. Besonders häufig findet man sie bei den Würmern, am häufigsten bei den Gliedertieren, während sie bei den anderen Klassen der Metazoen nur in einzelnen Familien anzutreffen sind. Unter den Gliedertieren sind die Insekten am meisten infiziert und unter diesen wieder die Käfer, deren Larven scheinbar infolge ihrer Lebensweise der Verbreitung der Gregarinen besonders günstig sind. Die Larven suchen, wie auch oft die Käfer selbst, ihre Nahrung in einem Medium, das mit dem Kot der älteren infizierten Käfer reichlich entleerte Cysten enthält. Der Name „Gregarinen“ soll andeuten, daß sie gewöhnlich, namentlich im Darm ihrer Wirtstiere, „herdenweise“ angetroffen werden.

Die Parasiten sind von ovoider oder fadenförmiger Gestalt und von beträchtlicher Größe. Bisweilen sind sie so groß, daß sie mit unbewaffnetem Auge gesehen werden können (Monocystis magna in Lumbricus und Allolobophora terrestris und Porospora gigantea im Darm des Hummers, die eine Länge von 1 cm und darüber erreicht). Es ist aus diesem Grunde zu verstehen, daß man sie anfangs für Würmer hielt, bis Kölliker im Jahre 1845 ihre Zugehörigkeit zu den Protozoen feststellte. Gesehen wurden die Gregarinen schon 1787 von Cavolini im Darm eines Krebses; im Jahre 1828 gab ihnen Dufour den Namen Gregarinen, hielt sie aber noch für mit den Trematoden verwandte Würmer.

Die erwachsenen vegetativen Formen der Gregarinen verbringen ein verhältnismäßig langes Stadiums ihres Lebens außerhalb von Zellen, ehe sie zur Fortpflanzung schreiten. Sie nehmen während dieser Zeit auf endosmotischem Wege Nahrung auf und vermehren sich während dieses Zustandes niemals durch Teilung, wenn wir von der kleinen Gruppe der Schizogregarinen und Aggregaten absehen, die eine Ausnahme bilden und sich auf ungeschlechtlichem Wege durch Teilung (Schizogonie) fortpflanzen können.

Dadurch ergibt sich eine einfache, wenn auch vielleicht keine ganz natürliche Einteilung der Gregarinen.

System der Gregarinen.

I. Unterordnung: **Eugregarinaria** (Doflein).

Typische Gregarinen ohne Schizogonie. Umfaßt die bei weitem größte Zahl aller bekannten Gregarinen.

A. Monocystidea. Körper einheitlich und zumeist sehr beweglich (metabol). Bisweilen am vorderen Körperpol ein epimeritähnliches Gebilde. Die meisten Arten sind Coelomparasiten.

1. Coelom-Monocystideen. Gattungen: Monocystis, Lithocystis, Eirmocystis, Urospora, Gonospora usw.

2. Darm-Monocystideen. Gattungen: Lankesteria, Doliocystis usw.

B. Polycystidea. Scheidung des Körpers in Deutomerit, Protomerit und Epimerit.
Gattungen: Clepsidrina, Actinocephalus, Stylorhynchus, Dactylophora, Echinomera, Stenophora usw.

II. Unterordnung: **Schizogregarinaria** (Léger).

Gregarinen mit Schizogonie, also Teilung der erwachsenen Formen.

Gattungen: Ophryocystis, Schizocystis, Selenidium, Selenococcidium.

III. Unterordnung: **Aggregataria** (Labbé).

Gregarinen mit Schizogonie und Wirtswechsel. Schizogonie und Sporogonie erfolgen in verschiedenen Wirtstieren. Die erstere geht in Crustaceen (Krabben), die letztere in Tintenfischen vor sich.
Gattung: Aggregata.

1. Unterordnung: **Eugregarinaria** (Doflein).

Zwei Grundtypen lassen für sich die Ordnung der Gregarinen aufstellen, die sich auf die großen Abteilungen der Eugregarinen, die Monocystiden und Polycystiden, verteilen. Die Vertreter der Monocystiden, die vorzugsweise in Würmern schmarotzen, in deren Leibeshöhle, aber seltener in deren Darm sie vorkommen, unterscheiden sich von den Polycystiden dadurch, daß ihr Körper einen einheitlichen Schlauch darstellt und nicht septiert ist (Fig. 1). Sie kommen auch gelegentlich in Echinodermen und Ascidien usw. vor, aber ihre Hauptverbreitung haben sie in der Klasse der Würmer. Bekannt sind die zahlreichen Vertreter dieser Gruppe, die in den Samenblasen (niemals im Hoden) der Regenwürmer leben und die erst neuerdings durch Hesse (1909) genauer bekannt geworden sind und systematisch auseinandergehalten werden können.

Im Gegensatz zu ihnen stehen die Polycystiden, deren Körper durch ektoplasmatische Scheidewände in zumeist drei ungleichgroße Abschnitte geteilt ist, die man als Deuto-, Proto- und Epimerit bezeichnet (Fig. 2 und 3). Es darf nicht unerwähnt bleiben, daß auch bei den Monocystiden gelegentlich epimeritähnliche Gebilde vorkommen, jedoch sind diese nicht starr und fest wie bei den Polycystiden, sondern veränderliche Gebilde, die rüsselartig vorgestreckt und wieder eingezogen werden können (z. B. Lankesteria ascidiae, Fig. 4). Mitunter ist der Körper mancher Monocystidenarten (z. B. Rhynchocystis pilosa Cuénot) ganz oder teilweise mit feinen Auswüchsen der Cuticula bedeckt, die wohl nach der Auffassung der Autoren zur Vergrößerung der ernährenden Oberfläche dienen werden.

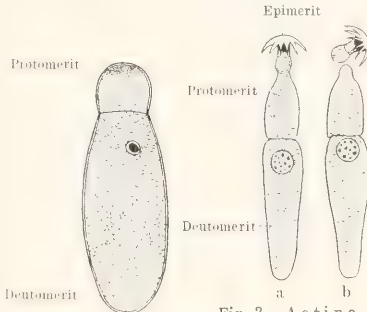


Fig. 2. Gregarina polymorpha aus dem Darm der Larve von Tenebrio molitor.

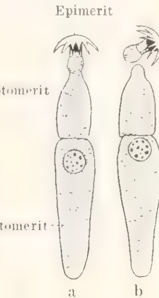


Fig. 3. Actinocephalus Dujardini aus dem Darm von Lithobius forficatus. a mit Epimerit, b Abwerfen des Epimerits.

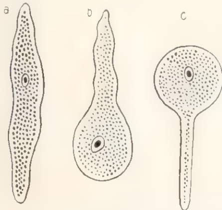


Fig. 1. Monocystis agilis lumbrici in drei verschiedenen Kontraktionszuständen. Aus den Samenblasen des Regenwurms.

Bemerkenswert ist die teilweise enorme Beweglichkeit (Metabolie) und die damit verbundene Plasmaströmung der meisten Monocystiden im Gegensatz zu den Polycystiden, denen man außer gelegentlich eintretenden ruckartigen Knickungen des Körpers keine äußerliche Bewegung anzusehen vermag, obwohl sie sich gleitend vorwärts bewegen.

Die Körperwand der Gregarinen ist kompliziert gebaut (Fig. 5 C und D). Man unterscheidet eine ziemlich kräftige, in den meisten Fällen doppelt konturierte Cuticula (Epicyt), die aus längsverlaufenden Rippen besteht (Fig. 5 B 1). Unter ihr soll nach Schewiakoff eine

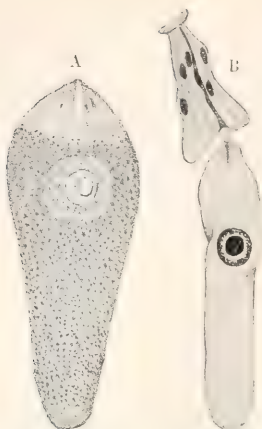


Fig. 4 A und B. Lankesteria ascidiae. A erwachsenes, bewegliches Tier mit großem Kern und Nucleolus. B freie Darmgregarine derselben Art, oberflächlich am Darmepithel fixiert. Nach Siedlecki. Aus Doflein.

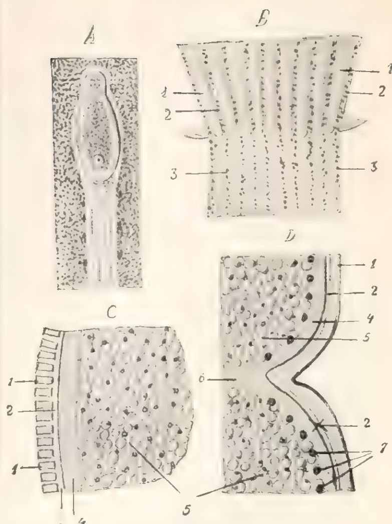


Fig. 5 A bis D. Clepsidrina Munieri Schneid. A in Bewegung begriffenes Tier, welches in fein zerriebener Tusche eine Gallertspur hinterläßt. B Hinterende desselben. 1 Cuticularrippen. 2 Furchen. 3 austretende Gallertfäden. C Stück eines Quer-, D eines Längsschnittes. 1 Cuticula mit Rippen. 2 Gallertschicht, durch die Furchen nach außen offen. 4 Ektoplasma. 5 Endoplasma. 6 Fortsetzung des Ektoplasma als Scheidewand zwischen Proto- und Deutomerit. 7 Muskelfibrillen. Nach Schewiakoff. Aus Doflein.

Gallertschicht (Fig. 5 C 2) liegen, die aber an zahlreichen Gregarinen nicht nachgewiesen werden konnte (Hesse). Diese Gallertmasse ist zur Erklärung der merkwürdigen Gleitbewegung der Polycystiden herangezogen worden. Sie sollte in Form von Fäden, die in dem umgebenden Medium erstarrten und auf denen sich durch fortwährende Verlängerung die Gregarine weiterschieben sollte, durch die Rippen der Cuticula ausgeschieden werden (Fig. 5A und B). Diese Auffassung über die Ursache der Fortbewegung mancher Gregarinen ist im Laufe der Zeit lebhaft bekämpft worden (siehe Sokolow 1912). Eine einleuchtende Erklärung für dieses Phänomen ist auch heute noch nicht vorhanden.

Unter der Gallertschicht, wenn sie vorhanden ist, im entgegengesetzten Falle direkt unter der Cuticula liegt das homogene Ektoplasma (Fig. 5 C 4), von vielen Autoren auch das Sarkocyt genannt, und unter diesen eine Myonemschicht (Myocyt oder Fibrillenschicht), die in den meisten Fällen vorzüglich ausgebildet ist (Fig. 5D 7 und Fig. 6) und oftmals die Form eines Netzwerkes aufweist. In dem auf diese Schichten folgenden Endoplasma (Fig. 5C und D 5) sind große Mengen Reservestoffe (Zooamylum und Paraglykogenkörnchen) aufgehäuft, die der Gregarine bei auffallendem Licht ein milchweißes Aussehen verleihen. Außerdem können, speziell im Protomerit, chromatoide Körper auftreten, die sich bei manchen Formen zusammenballen und einen sogenannten „Protomeritkern" bilden sollen. Jedoch ist die Kernnatur dieser Gebilde noch nicht sicher festgestellt (siehe Dogiel 1908 und Léger et Duboscq 1909). Neben diesen chromatoiden Körnchen finden sich im Protomerit häufig starke Ansammlungen von Volutin (Schellack 1912). Oftmals sollen aus dem großen, bläschenförmigen Kern Chromatinteile in Form von Chromidien auswandern. Auch diese Verhältnisse bedürfen noch der Klärung (Moroff 1908). Der Deutomerit enthält bei den Polycystiden den Kern. Er ist groß und bläschenförmig und zumeist mit starkem chromatischem Binnenkörper (Karyosom) versehen, der das Innere des Kernbläschens mitunter nahezu völlig ausfüllt.

Bei den meisten Polycystideen findet sich am vorderen Körperende, dem Protomerit aufsitzend und eine eigenartige Differenzierung der Cuticula bildend, ein rüsselartiger Fortsatz, der Epimerit (Fig. 3 und Fig. 7), der zumeist mit



Fig. 6. Schema einer Gregarine. E Epimerit. P Protomerit. D Deutomerit. Nach M. Schneider. Aus Doflein.

Haken, Zähnchen und anderen Anhängen versehen ist und mit dessen Hilfe sich die Gregarine an den Epithelzellen des Wirtes festhält. Dieser zur Befestigung und höchstwahrscheinlich auch zur Nahrungsaufnahme dienende Apparat wird vor der Encystierung entweder abgeworfen oder zurückgebildet (Fig. 3b). Oftmals erstreckt sich der Epimerit tief in die Epithelzellen hinein, mitunter gehen seine Fortsätze sogar durch die Zellen hindurch bis in die Blutlacunen der Submucosa, so daß es in diesen Fällen sehr wahrscheinlich ist, daß er zur Nahrungsaufnahme benutzt wird. Bei Stylorhynchus ist ein Kanal beschrieben worden, der vom Grunde des Epimerits durch den Protomerit bis in den Deutomerit reicht. Im allgemeinen findet wohl außerdem die Ernährung der Gregarinen, da ihnen, mit anscheinend einer Ausnahme, eine Mundöffnung fehlt, auf osmotischem Wege durch die gesamte Körperoberfläche statt.

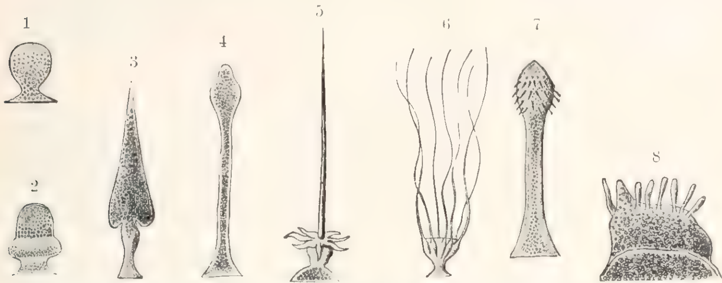


Fig. 7. Epimeritformen. 1 Gregarina longa. 2 Sycia inopinata. 3 Pileocephalus Heeri. 4 Stylorhynchus longicollis. 5 Beloides firmus. 6 Cometoides crinitus. 7 Geniorrhynchus Mounieri. 8 Echinomera hispida. Nach Léger. Aus Doflein.

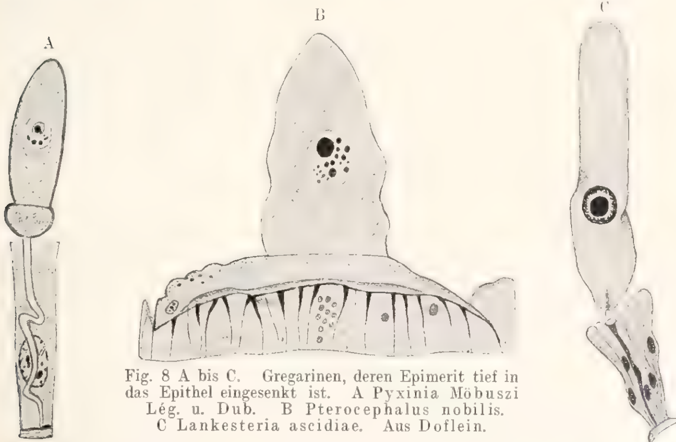


Fig. 8 A bis C. Gregarinen, deren Epimerit tief in das Epithel eingesenkt ist. A Pyxinia Möbuszi Lég. u. Dub. B Pterocephalus nobilis. C Lankesteria ascidiae. Aus Doflein.

Kontraktile Vakuolen sind bislang bei Gregarinen nicht gefunden worden, doch treten mitunter im Plasma kleine Bläschen und Lakunen mit ausführenden Kanälchen auf, die als Exkretionsorgane gedeutet worden sind.

Bei manchen Polycystiden aus der Gattung der Gregarinidae pflegen häufig die im Darmlumen befindlichen Individuen zumeist zu zweien, aber auch mitunter zu ganzen Ketten vereint zu sein. Man bezeichnet dann das vordere Tier als „Primit", das hintere als „Satellit". Ob diese Erscheinung mit einer bevorstehenden Encystierung und Fortpflanzung in näherer Beziehung steht, ist unsicher (Fig. 9 und 10).

Während die ausgewachsenen Gregarinen ziemlich kompliziert aufgebaut und an ihre Lebensweise vortrefflich angepaßt sind, ist ihr Entwickelungskreis im Gegensatz zu anderen Sporozoengruppen verhältnismäßig einfach. Mor-

phologisch betrachtet, gehören die Gregarinen zu den höchstentwickelten Sporozoen; was ihre geschlechtliche Fortpflanzung anbetrifft zu den einfachsten. Die Gregarien beginnt ihre Entwickelung entweder innerhalb oder an einer



Fig. 9. Zwei verklebte Individuen von Gregarina polymorpha aus dem Darm der Mehlkäferlarve (Tenebrio molitor).

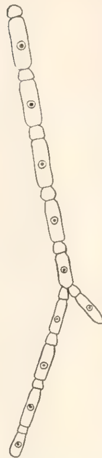


Fig. 10. Kettenförmige Verbindung von Hirmocystis polymorpha. Nach Léger.

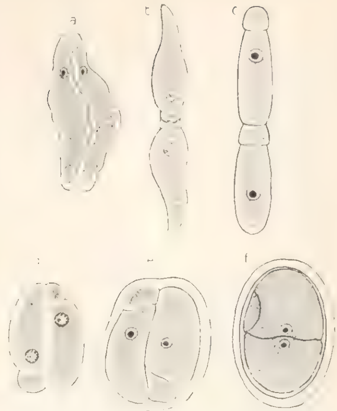


Fig. 11. Kopulation und Encystierung der Gregarinen. a) Vereinigung zweier Monocystiden (Monocystis agilis lumbr.), b) Vereinigung zweier Polycystiden mit ihren Protomeriten, c) Vereinigung zweier Polycystiden hintereinander (Gregarina polymorpha), d) Vorbereitung zur Encystierung (Gregarina blattarum), e) Encystierung von Gregarina blattarum, f) ältere Cyste von Gregarina blattarum. e u. f nach Bütschli.

Wirtszelle festhaftend. Es gibt eine ganze Anzahl, hauptsächlich Monocystideen und Stenophorideen, deren Jugendstadien vollständig in eine Wirtszelle eindringen und erst auf späteren Entwickelungsstadien wieder herauswandern, z. B. Gregarina acridiorum (Berndt), Lankesteria ascidiae (Siedlecki), Stenophora (Léger und Duboscq) usw., während andere niemals ein intrazelluläres Stadium durchlaufen, z. B. Stylorhynchus longicollis (Moroff), Gregarina ovata (Pähler), Echinomera hispida (Schellack) usw. Liegt die Gregarine anfangs völlig innerhalb einer Zelle, so wächst sie bald aus dieser heraus, ist aber noch für eine geraume Zeit ihres Wachstums mit ihr durch den Epimeriten in Verbindung. Schließlich löst sie sich los und fällt in eine Körperhöhle ihres Wirtes, gewöhnlich in den Verdauungskanal, oft in das Cölom, oder in andere Körperhöhlen und in Blutgefäße. Hier fährt sie fort zu wachsen, indem sie die nötige Nahrung ihrem Wirte entnimmt, bis sie ihre entsprechende Größe erreicht hat. Dann encystiert sie sich, meistens nach Vereinigung mit einem anderen Individuum, bisweilen jedoch auch allein oder zu mehreren. Unter normalen Verhältnissen scheinen sich aber immer nur zwei erwachsene Tiere zwecks geschlechtlicher Fortpflanzung in eine gemeinsame Cystenmembran einzuschließen. Die Aneinanderlagerung der kopulierenden Tiere kann auf verschiedene Weise stattfinden, entweder seitlich, hintereinander, mit den Vorderenden und sogar gekreuzt (Fig. 11). Unter langsamen Rotationsbewegungen, bei denen eine allmähliche Verkürzung der Längsachsen der beiden Tiere eintritt, beginnt die Ausscheidung der Hülle. Dieselbe ist in den meisten Fällen doppelt und besteht aus einer äußeren, gallertigen und einer inneren elastischen, kräftigen und undurchlässigen Membran.

Bei einigen Formen, speziell Vertretern der Polycystideen, sind geschlechtliche Differenzierungen der zur Kopulation schreitenden Einzeltiere wahrscheinlich gemacht worden. Männchen und Weibchen sind durch die histologische Struktur ihres Plasmas unterschieden. Die Waben desselben können bei dem männlichen Tier größer als beim weiblichen sein, so daß bei Färbungen das Plasma des Weibchens dunkler erscheint. Merton (1911) z. B. beschreibt eine neue Gregarine aus dem Darm von Scolopendra subspinipes, Nina indica, bei der schon im freilebenden Stadium männliche und weibliche Tiere zu unterscheiden sind. Die Männchen sollen in diesem Falle dichteres Plasma, die Weibchen grobmaschigeres besitzen. Léger und Duboscq (1909) haben bei Gregarina polymorpha ebenfalls geschlechtliche Unterschiede der beiden Tiere innerhalb der Cyste festzustellen vermocht. Auch in diesem Falle soll das eine Exemplar stärker färbbares Plasma besitzen als das andere. Es gibt in der Literatur noch mehrfache Angaben, die dieses Verhalten bestätigen. Auch Verschiedenheit in der Gestalt der beiden encystierten Tiere ist nachgewiesen worden. So wächst nach den Untersuchungen von Schellack (1907), das weibliche Tier von Echinomera hi-

spida, indem es eine birnförmige Gestalt annimmt, in das kappenförmig werdende Männchen hinein (Fig. 12). Außerdem sind beim Männchen die Waben des Protoplasmas größer. Jedenfalls scheint es nach den ganzen Angaben in der

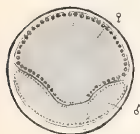


Fig. 12. Cyste von Echinomera hispida. Nach Schellack.

Literatur wahrscheinlich zu sein, daß beide zur Encystierung schreitende Tiere geschlechtlich differenziert sind, was ja auch bei der Gametenbildung in den meisten Fällen klar zutage tritt. Solange die Tiere noch nicht encystiert sind, ist es nicht oder nur äußerst selten und schwierig möglich, sie morphologisch in dem angegebenen Sinne zu unterscheiden. Nach der Encystierung liegen die Tiere in der zumeist völlig kugeligen Cyste dicht nebeneinander, ohne miteinander zu verschmelzen (Fig. 13).



Fig. 13. Die Fortpflanzung einer polycystiden Gregarine. Zwei Individuen haben sich mit einer gemeinschaftlichen Kapsel umgeben (Encystierung).

Die nach der Encystierung stattfindenden Entwickelungsprozesse scheinen bei allen typischen Gregarinen (Eugregarinen) ziemlich übereinstimmend zu verlaufen, wie für zahlreiche Formen bekannt geworden ist. Der Kern eines jeden Tieres löst sich auf und nur ein kleiner Teil des Chromatins findet weitere Verwendung für die Bildung der ersten Teilungsspindel. Diese Spindel (Fig. 14) ist im Verhältnis zum ruhenden

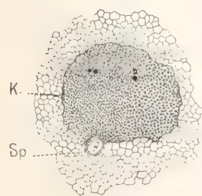


Fig. 14. Erste Kernteilung in der Cyste von Gregarina ovata. Die sehr kleine Spindel (Sp) ist im Begriff, aus dem Kern (K) auszutreten. Der Hauptkern (K) geht zugrunde (somatischer Kern). Nach Schnitzler.

Kern von so minimaler Größe, daß sie lange Zeit von den Beobachtern übersehen wurde und auch bis heute nur in vereinzelten Fällen zur Beobachtung gekommen ist (Siedlecki, Mràzek, Cuénot, Schnitzler usw.). Es findet die Absonderung einer kleinen Menge Chromatin statt, das wohl als Idiochromatin oder generatives Chromatin anzusehen ist, während das Somatochromatin zugrunde geht. Es liegt nicht nur nahe, diese Prozesse mit dem Mikro- und Makronucleus der Ciliaten in Vergleich zu setzen, sondern auch mit der Bildung der ersten Richtungsspindel im Metazoenei. Das starke Wachstum und die Aufspeicherung von Reservematerial der Gregarine vor ihrer Encystierung entspricht durchaus dem Wachstum und der Dotteraufspeicherung des heranwachsenden Eies. Es handelt sich hier nicht nur um gewisse Aehnlichkeiten, sondern um weitgehende physiologische Parallelen zwischen Gregarine und Metazoenei (Moroff 1907, Léger und Duboscq 1908).

Diese erste Teilungsspindel (Fig. 14 Sp) besteht aus einer echten Mitose. Es fehlen weder Chromosomen, Aequatorial- und Tochterplatten und Polstrahlungen mit Centriolen. Bei den Gregarinen kommen im Gegensatz zu den Coccidien bei den meisten Spindeln sehr schöne Centrosomen zur Ausbildung. Ob die Strahlungen rein protoplasmatischer Natur sind, oder als Teile der achromatischen Figur aus dem Kern entstehen, ist noch nicht sicher entschieden. Ebenfalls kennt man Spindeln, an denen Centriolen nicht festgestellt werden konnten. Wenn man mit Moroff und vielen anderen Autoren den Standpunkt vertritt, daß das Centriol kein echter Kern, sondern nur ein untergeordnetes sekundäres Gebilde ist, so ist die Entscheidung der Frage, ob bei der ersten Teilungsspindel der Gregarinencyste ein Centriol vorhanden ist oder nicht, von ganz geringer Bedeutung.

Nach der Spindelbildung wird der vegetative Rest des Hauptkernes aufgelöst und verteilt sich im Plasma. Wenn auch bei den verschiedenen Gregarinen mannigfaltige Abweichungen in der Bildung der ersten Teilungsspindel stattfinden, so sind doch im allgemeinen die weitgehendsten Uebereinstimmungen in den Angaben der Autoren vorhanden, obwohl über die Art und Weise, wie diese Spindel gebildet wird, gewisse Meinungsverschiedenheiten herrschen (Mulsow 1911).

Der ersten Kernteilung folgt eine große Zahl weiterer mitotischer Teilungen (Fig. 15, 4 und 5), die schließlich als Resultat eine große Menge kleinerer Kerne (die zukünftigen Gametenkerne) in beiden Tieren ergibt (Fig. 15, 6). Diese rücken, ähnlich wie bei einer superfiziellen Furchung, an die Oberfläche der beiden, immer noch getrennten Gregarinen (Fig. 15, 7), die jetzt insofern ihre Gestalt geändert haben können, als tiefe Furchen und Einkerbungen ihnen mitunter ein gelapptes Aussehen verleihen.

Nach neueren Beobachtungen von Mulsow (1911) sollen bei Monocystis rostrata auf diesem Stadium bereits die Reduktionsteilungen stattfinden, während nach den früheren Untersuchungen von Pähler, Schnitzler, Léger und Duboscq usw. diese Prozesse erst durch ungleiche Teilungen an den Gameten vor sich gehen. Jedoch war es diesen Autoren infolge der Kleinheit der Objekte nicht möglich, eine Verringerung der Chromosomenzahl auf die Hälfte festzustellen, wodurch erst eine wirklich stattgefundene Reduktion nachgewiesen wäre. Mulsow vermochte jedoch an den letzten Teilungen der Tochterkerne von Monocystis rostrata nur 4 Chromosomen nachzuweisen, während die

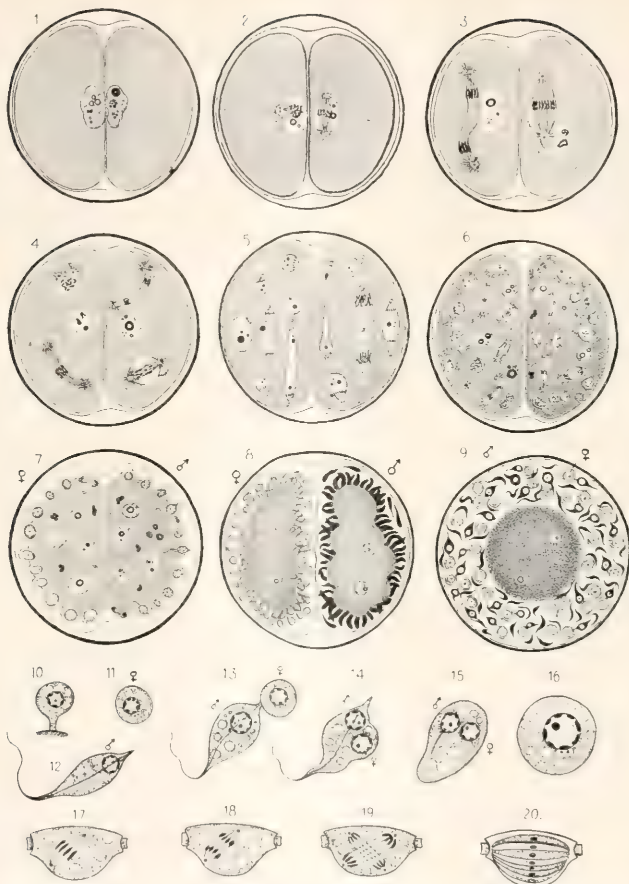


Fig. 15. Geschlechtliche (propagative) Fortpflanzung einer polycystiden Gregarine (Stylorhynchus longicollis nach Léger. Etwas schematisiert). Figurenerklärungen siehe Text.

vorhergehenden Spindeln die doppelte Zahl erkennen ließen. Eine zweite Reifeteilung war von dem Autor nicht festzustellen.

Durch den Zerfall des Plasmas in mäandrische Partien wird die Oberfläche der zur Gametenbildung schreitenden Gregarinen wesentlich vergrößert (Fig. 16A). Die Ausbildung der Gameten beginnt im allgemeinen in dem einen Tier etwas früher als in dem anderen, so daß das eine schon Gameten zeigen kann, während im anderen noch die letzten Kernteilungen stattfinden, an denen dann die von Mulsow und anderen angegebenen Reifeteilungen studiert werden können. Freilich scheinen in den meisten Fällen die Vermehrungsteilungen direkt in die Reifeteilungen überzugehen, so daß dadurch die Feststellung wesentlich erschwert wird, ob man eine Vermehrungsspindel oder eine Reifespindel vor sich hat.

Die Bildung und Abschnürung der Gameten scheint bei den meisten Gregarinen in ähnlicher Weise zu verlaufen. Kernhaltige Plasmaportionen wölben sich auf der oberflächlichen Schicht des Gregarinenkörpers empor und schnüren sich schließlich ab. Es zerfällt also die Gregarine in eine größere Anzahl peripherer kernhaltiger Fortpflanzungskörperchen (Gameten)

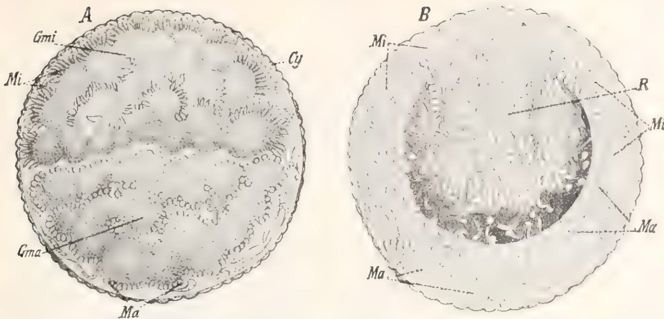


Fig. 16 A und B. Gametenbildung und Befruchtung bei der Gregarine Stylorhynchus longicollis F. St. A die beiden gemeinsam encystierten Individuen in der Umwandlung in zahlreiche Gameten begriffen. Gmi erzeugt die beweglichen Mikrogameten (Mi) und Gma die unbeweglichen Makrogameten (Ma). B Umeinanderwirbeln der Gameten beim Befruchtungsakt. Cy Cyste. R Restkörper. Nach Léger. Aus Doflein.

und in eine zentrale, vakuolisierte Plasmamasse, die als Restkörper bezeichnet wird (Fig. 15, 8).

Die anfangs ziemlich gleichartig gebauten Gameten erfahren, besonders bei den Vertretern der Polycystideen, bemerkenswerte Veränderungen ihrer Gestalt (Fig. 15, 8), die schließlich zu einer Ausbildung von weiblichen und männlichen Gameten führen (Geschlechtsdimorphismus). Die weiblichen Fortpflanzungskörper werden kugelförmig, die männlichen bleiben gestreckt, so daß man von einer Anisogamie sprechen kann. Dagegen sind die Unterschiede zwischen den beiden Gametenformen bei der größeren Mehrzahl der Monocystideen äußerst gering (Hoffmann), so daß man lange Zeit die Vermutung hegte, sie besäßen überhaupt nur gleichartige Gameten (Isogameten).

Sobald die Gameten eine bestimmte Entwickelung erreicht haben, erfolgt der interessante Prozeß der Verschmelzung und Befruchtung (Fig. 15, 9 und 13). Obwohl die männlichen Formen eine gewisse Eigenbewegung zeigen, suchen sie doch nicht selbständig die weiblichen Gameten auf, sondern werden mit ihnen durch die amöbenartige Tätigkeit des Restkörpers zusammengeführt (Berndt 1902). Der aus beiden Muttertieren verschmolzene Restkörper führt wellenartige Bewegungen innerhalb der Cyste aus und sorgt auf diese Weise für die Vermischung der Gameten (Fig. 15, 9).

Neben dieser wichtigen Funktion bildet der Restkörper bei jenen Formen, die Cysten mit Sporodukten besitzen, handschuhfingerförmig eingestülpte Röhren, die bei der Entleerung der Cyste die Sporen ausschleudern, indem sie sich nach außen umstülpen (Fig. 17, 4). Nach der Kopulation umgeben sich die vereinigten Gameten mit einer feinen Membran und bilden auf diese Weise die Sporocysten. Die weitere Entwicklung derselben besteht in der mitotischen Teilung des Kernes in mehrere, zumeist 8 Sprößlinge. Das Plasma sondert sich in die der Kernzahl entsprechenden Portionen, so daß schließlich in der reifen Cyste, eine bestimmte Anzahl von jungen Gregarinen (Sporozoiten) liegen. Die Hülle der Spore oder Pseudonavicelle ist doppelt, daher Exospore (äußere) und Endospore (innere Hülle).

Bereits auf dem Sporocystenstadium werden bei den meisten Polycystideen die Sporen aus den Sporodukten ausgeschleudert. Bei Monocystis rostrata wandern die jungen Sporocysten in den Restkörper hinein und beladen sich während ihres Aufenthaltes mit Glykogenschollen. Früher hielt man eine Quellung des Restkörpers für die Ursache des Ausschleuderungsprozesses; heute ist man mehr geneigt, daß in der Hauptsache nach die zusammenpressende Kraft der einschnurrenden Cystenhülle diese Wirkung hervorbringt (Fig. 17, 2). Möglicherweise wirken beide Ursachen zusammen.

Was die Infektion neuer Wirtstiere anbetrifft, so werden bei den meisten Polycystideen die Sporocysten mit ihrem unentwickelten Inhalt nach außen gebracht und lassen an der Luft unter Sauerstoffzutritt die Sporozoiten reifen (Fig. 15 17—20). Bringt man sie künstlich unter Luftabschluß, so gehen sie zumeist zugrunde. Sobald sie sich zu reifen Sporen entwickelt haben, sind sie infektionsfähig und werden mit der Nahrung von neuen Wirtstieren aufgenommen. Unter der Einwirkung des Darmsaftes platzt die Sporenhülle und die Sporozoite verlassen unter gleitenden, ruckweise knickenden Bewegungen die Kapsel, um sich entweder in eine Epithelzelle des Darmes oder eines anderen Organes völlig einzubohren (Monocystideen) oder sich ihr äußerlich anzuheften und nur das Vorderende in die Zelle einzusenken (die meisten Polycystideen). Viele Sporen öffnen sich nicht ausschließlich nur unter der Einwirkung des spezifischen Darmsaftes des von ihnen bewohnten Wirtes, sondern können auch durch die Darmsäfte anderer Wirte zum Platzen gebracht werden. Merkwürdigerweise kommen bei manchen Gregarinen Sporen verschiedener Form und Größe

vor (Makro- und Mikrosporen). Ihre Bedeutung ist noch völlig unbekannt. Bei den Monocystideen macht die Erklärung der Infektion neuer Wirtstiere gewisse Schwierigkeiten. Wenn es sich um Darm-Monocystideen handelt, so werden die Sporen mit dem Kot aufgenommen. Die Uebertragung der Sporen der Cölom-Gregarinen ist schwieriger zu erklären. Wie geschieht z. B. aus der Samenblase und aus der Leibeshöhle mancher Würmer heraus die Infektion neuer Wirte? Werden die Cysten mit dem Tode des Wirtstieres frei, so ist der Weg zur Infektion gegeben (Hesse 1909). Weitere Untersuchungen müssen über diesen Vorgang noch die nötigen Aufklärungen bringen.

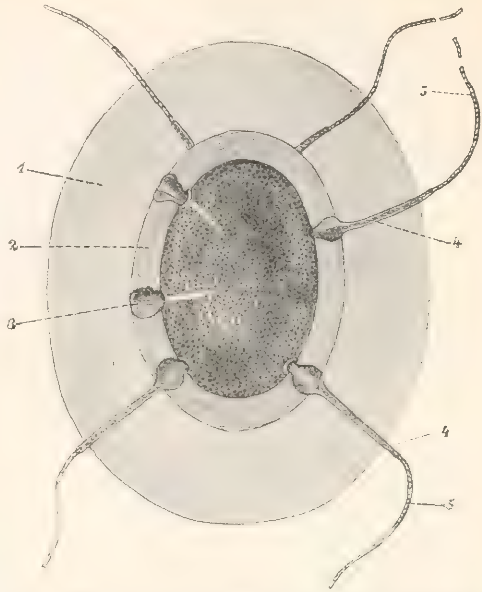


Fig. 17. Reife Cyste von Gregarina blattarum mit ausgestoßenen Sporodukten. 1 Gallerthülle. 2 Cystenwand. 3 noch eingestülpte, 4 ausgestülpte Sporodukte, aus denen die perlschnurartig an einandergereihten Sporocysten austreten. 5 Sporocystenreihe. Nach Schneider. Aus Doflein.

2. Unterordnung:

Schizogregarinaria (Léger).

Die Gregarinen dieser Gruppe (Fig. 18 A u. B und Fig. 19) können sich im Gegensatz zu den meisten übrigen Formen (Eugregarinen) durch Teilung vermehren (Schizogonie). Bildung und Bau der Sporen zeigen keine wesentlichen Abweichungen von denen der echten Gregarinen. Die typischen Vertreter dieser Gruppe sind das ganze Leben hindurch extrazellulär, nur bei einigen Gattungen gibt es intrazelluläre Formen. Befruchtung und Gametenbildung sind nur von einigen Schizogregarinen genauer bekannt und verlaufen stark abweichend. Die Gregarinen leben im Darm von Anneliden, Arthropoden und Tunicaten; speziell sind diejenigen aus den Malpighischen Gefäßen von Käfern näher beschrieben worden. So lebt Ophryocystis Mesnili Léger (Fig. 18A) in den Malpighischen Gefäßen von Tenebrio molitor, deren Entwickelungsgang kurz besprochen werden soll (Fig. 20A bis H). An den erwachsenen Tieren ist keine Scheidung in Proto- und Deutomerit vorhanden. Der Körper ist zum Zweck der Festheftung mit formbeständigen, pseudopodienartigen Fortsätzen (Radicellen) versehen, die in das Epithel der Malpighischen Gefäße eindringen (Fig. 18). Ihre Körpergestalt ist wenig gregarinen-, sondern mehr plasmodienähnlich (daher früher „Amöbosporidien"). Die Encystierung, Sporocystenbildung und 8 Sporozoiten innerhalb der Spore (Fig. 20A bis H) zeigen die Zugehörigkeit zu den Gregarinen.

Der Sporozoit von Ophryocystis Mesnili dringt nicht in die Zellen der Malpighischen Gefäße ein, sondern entwickelt sich extrazellulär (Fig. 18A). Während des Wachstums tritt Kernvermehrung ein; die Individuen zerfallen in Einzeltiere, an denen sich nach einer gewissen Wachstumsperiode dieser Vorgang der ungeschlechtlichen Fortpflanzung durch Teilung wiederholen kann (Fig. 18A).

Nach Léger kann man zu gewissen Zeiten mycetoide und gregarinoide Formen unterscheiden. Letztere sind, wie schon der Name sagt, mehr gregarinenähnlich. Aus ihnen gehen die Geschlechtsformen hervor (Fig. 19b).

Diese vereinigen sich zu zweien, umgeben sich mit einer sehr zarten Membran und in jedem Individuum teilt sich der Kern. Es entsteht ein Geschlechtskern und ein sogenannter „somatischer Kern", der zugrunde geht. Der Geschlechtskern teilt sich abermals, wodurch eine echte Reduktion erfolgt (Léger). Der eine Tochterkern geht ebenfalls zugrunde, der andere umgibt sich als Gametenkern mit einer Plasmamasse. Es entstehen auf diese Weise zwei Isogameten, die miteinander verschmelzen und eine Sporocyste bilden, in der acht typische Sporozoiten entstehen (Fig. 20A—H).

Nach Léger ist es wahrscheinlich, daß die Schizogregarinen die gemeinsamen Stammformen der Coccidien und Gregarinen sind; nach Fantham soll die Schizogonie dieser Gruppe eine Neuerwerbung sein. Aus neueren diesbezüglichen Arbeiten scheint jedoch hervorzugehen, daß die

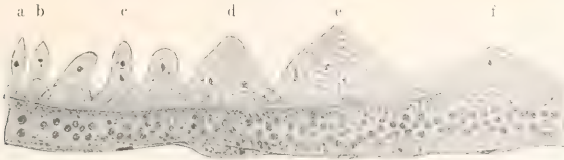


Fig. 18 A. Ophryocystis Mesnili Léger. Schnitt durch die Wand eines Malpighischen Gefäßes von Tenebrio molitor mit aufeinanderfolgenden Entwickelungsstadien (a bis f) des Parasiten (Schizogonie). Nach Léger. Aus Doflein.



Fig. 18 B. Schizogonie bei Ophryocystis Francisi Schn. Nach Ai. Schneider. Aus Doflein.

Schizogregarinen keine einheitliche Gruppe bilden sondern verschiedener Abstammung sind (Mesnil). Die Familie der Schizocystideen bestätigt diese

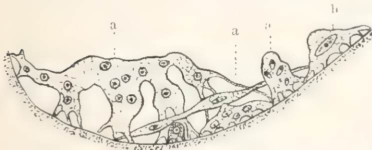


Fig. 19. Ophryocystis hagenmülleri Léger in den Malpighischen Gefäßen von Oelceratus gibbus. a mycetoide Formen, b = gregarinoide Form.

Annahme, da diese sich ebenfalls durch Teilung fortpflanzende Gruppe im Bau der Sporocysten und Gameten mit den Eugregarinen (Actinocephaliden) übereinstimmt, so daß eine Neuerwerbung der Schizogonie bei ihnen wahrscheinlich ist (Léger).

Die dritte Familie der Schizogregarinen, die Selenidien, trägt gleichfalls abweichenden Charakter. Die wurmförmigen, sehr beweglichen Parasiten besitzen ein Epimerit und verbringen ihre Jugendstadien innerhalb der Wirtszelle. Sie werden vielkernig und vermehren sich auf ungeschlechtlichem Wege durch Teilung. Die herangewachsenen Formen dieser Generation kopulieren, es entstehen innerhalb der Cyste Isogameten. Nach der Befruchtung entsteht die Zygote, in der sich die kugeligen oder stacheligen Sporen entwickeln. Von diesen enthält jede vier Sporozoite. Die Parasiten kommen in Anneliden, Gephyreen und Ascidien vor.

Eine interessante Form findet sich als Selenococcidium intermedium (Léger und Duboscq) im Hummer. Obwohl im allgemeinen sehr selenidienähnlich (auch hier Schizogonie), hat ihre geschlechtliche Fortpflanzung große Aehnlichkeit mit der der Coccidien. Ohne daß eine Encystierung zweier erwachsener Formen stattgefunden hätte, entwickelt sich ein Tier durch stärkeres Wachstum zu einem Makrogameten. Weiterhin entstehen spermienähnliche Mikrogameten. Ihre Sporogonie ist noch unbekannt. Wahrscheinliche Uebergangsform von den Coccidien zu den Gregarinen (Léger und Duboscq).

3. Unterordnung: Aggregataria (Labbé).

Telosporidien mit ungeschlechtlicher Fortpflanzung (ähnlich wie Schizogregarinen); von den Gregarinen jedoch durch das Fehlen der Syzygienbildung, Kopulation und Encystierung zweier Individuen unterschieden. Jede erwachsene vegetative Form bildet für sich allein Gameten, ohne sich zu encystieren. Ungeschlechtliche Fortpflanzung (Schizogonie) und geschlechtliche Prozesse (Sporogonie) erfolgen in verschiedenen Wirtstieren (Wirtswechsel).

Die erstere findet in Crustaceen (zumeist Krabben) statt, die letzteren in Tintenfischen. Es werden eiförmige Makrogameten und spermatozoenähnliche, zweigeißelige Mikrogameten gebildet. Die Befruchtung ist nicht ausreichend bekannt. Die Spore enthält 3—24 Sporozoiten. Der Entwickelungszyklus ist sehr coccidienähnlich. Durch den Wirtswechsel ist scheinbar die für die übrigen Gregarinen typische Encystierung verloren gegangen. Die systematische Stellung der Aggregaten ist noch unsicher; höchstwahrscheinlich gehören sie zu den Gregarinen, möglicherweise sind sie Coccidien.

Gattung: Aggregata, Frenzel.

Die zahlreichen Arten dieser Gattung kommen in dekapoden Krebsen und im Wirtswechsel bei Tintenfischen vor.

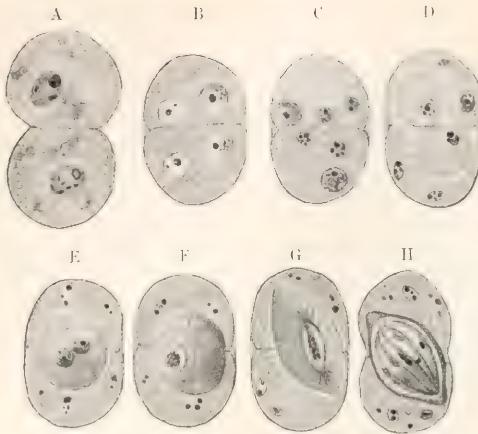


Fig. 20 A bis H. Ophryocystis Mesnili Léger. Kopulationserscheinungen. A Bildung der Syzygie. B beideSyzygiten zweikernig. C dreikerniges Stadium (ein somatischer Kern, ein Gametenkern, ein Reduktionskern in jedem Tier). D Gametenbildung. E Zygote mit noch getrennten Gametenkernen. F dieselbe mit Syncaryon. G Streckung der Zygote, erste metagame Teilung. H reife Spore mit 8 Sporozoiten. Nach Léger. Aus Doflein.

a) Ungeschlechtliche Fortpflanzung im Darm der Krebse (schizogregarinenähnlich).

Die von den Tintenfischen mit den Exkrementen entleerten Cysten werden von den Krebsen gefressen. Im Darm derselben werden die Sporozoiten frei (Fig. 21A bis C), durchbohren die Darmwand und wachsen unter der subepithelialen Schicht des Darms zu großen kugelförmigen Gebilden (Fig. 21D) heran, die sich in die Leibeshöhle ihres Wirtes vorwölben. Es erfolgen innerhalb der Individuen zahlreiche Kernteilungen. Der Parasit wird vielkernig und zerfällt in größere Partien (Fig. 21F). Die Kerne rücken an die Oberfläche und umgeben sich mit Plasma (Fig. 21G). Es bleibt ein beträchtlicher Restkörper zurück. Die in diesen „Cölomcysten“ auf ungeschlechtlichem Wege durch Teilung entstandenen Fortpflanzungskörper strecken sich nach der Abschnürung vom Muttertier in die Länge und bilden die jungen Agameten. Möglicherweise sind diese jungen Keime (Merozoiten) bereits geschlechtlich differenziert (Fig. 21H).

b) Geschlechtliche Prozesse im Darm der Cephalopoden (coccidienähnlich).

Werden die mit Aggregaten infizierten Krebse von Tintenfischen (Octopus, Sepia usw.) gefressen, so infizieren die Parasiten ihren neuen Wirt, ohne ins Wasser zu gelangen. Sie haben demnach eine schützende Cystenhülle nicht nötig. Die Keime bohren sich in die Darmwand des neuen Wirtes ein und gelangen in der Submucosa zur Ruhe. Nach einer Wachstumsperiode beginnt die geschlechtliche Differenzierung. Die einen Individuen entwickeln sich zu Makrogameten, die anderen bilden zweigeißelige Mikrogameten (Fig. 22A u. B). Die Befruchtung durch Vereinigung der beiden Gameten ist bisher noch nicht eingehender bekannt geworden. Aus der Zygote entwickelt sich die Spore, die bei den Parasiten von Sepia 3 bis 4, bei denen von Octopus 8 bis 24 Sporozoite enthält. Diese mit einer festen Hülle versehenen Sporen gelangen mit den Exkrementen der Tintenfische nach außen und müssen in den Darm der geeigneten Crustaceen gelangen, wenn die Sporozoiten ausschlüpfen und sich entwickeln sollen. Von den zahlreichen Arten sind bislang nur wenige genauer untersucht worden.

2. Ordnung: **Coccidia Leuckart.**

Die Coccidien, die den Gregarinen verwandtschaftlich nahestehen, sind nicht nur in den Jugendstadien, sondern auch als erwachsene, vegetative Formen dauernd in Zellen eingeschlossen, im Gegensatz zu den Gregarinen, die entweder niemals oder nur während ihrer Jugend Zellparasiten sind. Ihr einkerniger Körper besitzt weder eine Pellicula, noch eine Scheidung in Proto- und Deutomerit; es ist auch keine deutliche Differenzierung in Ekto- und Endoplasma vorhanden. Da das Ektoplasma als Schutz- und Bewegungsorganell Verwendung findet, so ist es begreiflich, daß es bei den dauernd intrazellulär lebenden, vegetativen Formen entweder fehlt oder doch stark zurückgebildet ist. Außerdem fehlt den Coccidien das Myocytfibrillensystem (das bei den beweglichen Formen der Gregarinen und Hämosporidien so gut ausgebildet ist), weil bei den erwachsenen Exemplaren weder ein aktiver Ortswechsel noch sonstige Gestaltsveränderungen vor sich gehen. Die ausgewachsenen Parasiten sind im allgemeinen kugelig oder ellipsoid geformt und füllen zumeist die Wirtszelle völlig aus (Fig. 23). Der große, bläschenförmige Kern liegt ungefähr in der Mitte des Körpers und enthält zumeist ein zentrales Binnenkörperchen (Karyosom). Granula und Fettkörnchen sind dem Plasma als Reservenahrung eingelagert und verdecken an lebenden Exemplaren zumeist völlig den Kern.

Selbständige Bewegungen vermögen nur die noch nicht in Zellen eingedrungenen Jugendformen (Mero- und Sporozoiten) und die reifen,

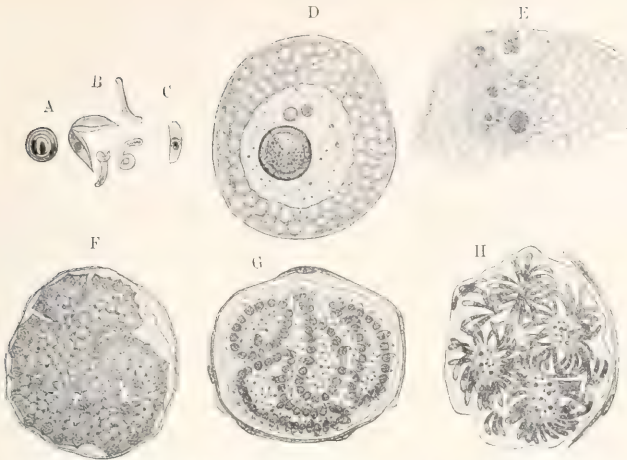


Fig. 21 A bis H. Aggregata Eberthi (Labbé). Schizogonie. A Cyste aus Sepia officinalis mit 3 Sporozoiten. B deren Entleerung im Darm von Portunus (Krabbe). C und D Stadien des Wachstums und der Ausbildung des Binnenkörpers. E erste Mitose. F vielkerniger Zustand. G und H Bildung der jungen Agameten. Nach Léger und Duboscq. Aus Doflein.

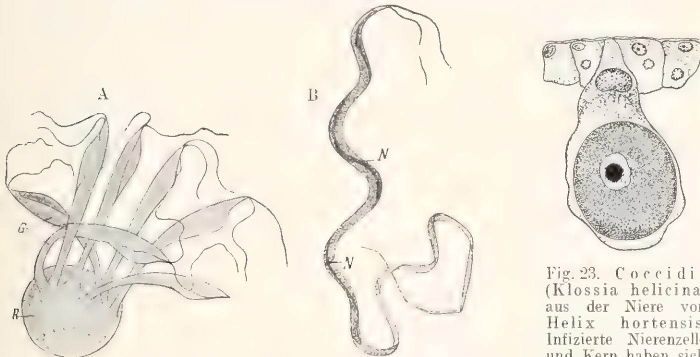


Fig. 22 A und B. Mikrogametenentwicklung bei Aggregata spinosa. A halberwachsene Mikrogameten (G), B vollkommen entwickelter Mikrogamet. N sein bandförmig umgebildeter Kern. Nach Moroff. Aus Doflein.

Fig. 23. Coccidie (Klossia helicina) aus der Niere von Helix hortensis. Infizierte Nierenzelle und Kern haben sich stark vergrößert. Der Kern von Klossia enthält ein großes Karyosom.

in zahlreichen Fällen mit zwei Geißeln versehenen männlichen Geschlechtsformen (Mikrogameten) auszuführen. Die Fortpflanzung findet in Form eines deutlich ausgeprägten Generationswechsels statt; es wechseln ungeschlechtliche Stadien (Schizogonie) mit geschlechtlichen (Sporogonie) ab. Wirtswechsel ist nicht vorhanden, wenn wir die Hämogregarinen ausschließen, bei denen er vorkommt. Die Infektion neuer Wirte wird durch die mit Cysten verunreinigte Nahrung vermittelt.

Die meisten Coccidien leben, wie die Gregarinen, im Darm der Wirtstiere und seinen Anhangsgebilden, demnächst in den Exkretions- und Geschlechtsorganen, gelegentlich finden sie sich auch in der Muskulatur, im Cölom und in den Blutbahnen, denn die ihnen nahe verwandten Hämogregarinen sind typische Blutkörperchenschmarotzer (wie die Hämosporidien). Sie schmarotzen während ihres ganzen vegetativen Daseins, d. h. während sie Nahrung aufnehmen

und wachsen, fast stets innerhalb von Epithelzellen. Letztere werden allmählich aber sicher durch die Coccidien zugrunde gerichtet, vorwiegend auf mehr mechanischem Wege, da der heranwachsende Parasit schließlich die ganze Zelle ausfüllt und sie sprengt. Seine Anwesenheit regt in vielen Fällen eine Hypertrophie der Zelle an, die eine Dehnung ihres Lumens mitunter auf das Zehnfache bewirkt. In den Exkretionsorganen scheinen die Coccidien selbst bei hochgradiger Infektion (siehe z. B. oftmals die Nierencoccidien von Helix nemoralis und Helix hortensis) keine schädliche Wirkung auf das Organ auszuüben, während von solchen Formen, die in den Epithelien der Verdauungsorgane und ihrer Anhangsgebilde (Leber, Gallengänge, Malpighische Gefäße usw.) schmarotzen, häufig schwere Erkrankungen und der Tod der Wirtstiere herbeigeführt wird. Bekannt sind die Coccidiosen der Kaninchen, der Maulwürfe und Mäuse, die rote Ruhr der Rinder und die schweren endemischen Erkrankungen des Hausgeflügels (Hühner, Gänse, Enten usw.). Die Tiere gehen zumeist unter profusen Diarrhöen infolge Zerstörung großer Flächen der Darmschleimhaut zugrunde.

Am häufigsten kommen die Coccidien bei den Wirbeltieren vor, bei denen sie in allen Gruppen mit Einschluß des Menschen vertreten sind, während die ihnen nahe verwandten Gregarinen eigentümlicherweise in dieser Abteilung gänzlich fehlen. Von den Weichtieren sind am häufigsten Schnecken infiziert. Unter den Arthropoden finden wir zahlreiche Arten bei den Myriopoden und bei einigen Familien der Insekten. Auch Anneliden bleiben nicht von ihnen verschont, während Coccidien bei den übrigen Wirbellosen bislang nicht angetroffen wurden.

Am bekanntesten und am leichtesten zur Untersuchung erhältlich sind die Darmcoccidien von Lithobius forficatus, die Nierencoccidien von Helix nemoralis und die Lebercoccidien des Kaninchens, weshalb wir diese Formen und ihren Entwickelungskreis auch hier an erster Stelle berücksichtigen wollen.

Die Coccidien aus dem Darm von Lithobius forficatus sind durch die klassischen Untersuchungen Schaudinns eingehender bekannt geworden. Es kommen bei diesem Tausendfüßler im ganzen 4 Coccidienarten vor, von denen drei, Eimeria Schubergi und Lacazei sowie Adelea ovata, durch die Arbeiten von Schaudinn und Siedlecki, die vierte, Barrouxia Schneideri, erst neuerdings durch die Untersuchungen Reichenows und Schellacks genauer beschrieben worden sind.

Eimeria (= Coccidium) Schubergi aus dem Darm von Lithobius forficatus (Fig. 24 nach Schaudinn). Diese Coccidie ist ein häufiger Parasit des Lithobius und kann leicht durch Zerzupfen des herauspräparierten Darmes erlangt werden. In infizierten Lithobien wird man stets verschiedene Stadien aus dem Entwickelungskreis der Eimeria Schubergi finden. Das Studium wird freilich dadurch etwas erschwert, daß der Lithobiusdarm, wie schon erwähnt, gleichzeitig von verschiedenen Coccidienarten bewohnt wird, die nebeneinander vorkommen können und durch Vermischung der einzelnen Stadien leicht irreführend wirken und zweifellos auch bei mehreren früheren Untersuchern irreführend gewirkt haben. Sie können jedoch durch die Größe und den Inhalt ihrer reifen, lebenden Cysten leicht auseinander gehalten werden, wie Schellack und Reichenow (1913) nachgewiesen haben.

Der Entwickelungskreis der Eimeria (=Coccidium) Schubergi verläuft auf Grund der Untersuchungen Schaudinns folgendermaßen (Fig. 24). Nachdem die von Lithobius mit der Nahrung aufgenommenen jüngsten Keime, die Sporozoiten (Fig. 24 I), Sporen und Cysten verlassen haben, dringen sie unter charakteristischen Bewegungen in die Darmzellen ein (Fig. 24 II). Diese jüngsten, schwer zu verfolgenden Prozesse sind noch nicht genügend untersucht, um allgemein sagen zu können, wie der typische Verlauf des Eindringens stattfindet. Werden die Cysten mit reifen Sporozoiten von Lithobius gefressen, so dauert es im allgemeinen 1 bis 2 Stunden, bis die Keime die Hüllen verlassen und sich sofort in die Wirtszellen einbohren. Der eingedrungene Sporozoit, der eine Länge von 15 bis 20 μ und einen Durchmesser von 4 bis 6 μ besitzt, wächst in etwa 24 Stunden zu einem kugeligen Gebilde heran (Fig. 24 III und IV), das, ohne eine Cystenmembran auszuscheiden, die Wirtszelle nahezu ausfüllt. Der herangewachsene Parasit trifft sehr bald die Vorbereitungen zu einer ungeschlechtlichen (multiplikativen) Fortpflanzung, die der starken Vermehrung des Parasiten innerhalb des Lithobius dient und den Wirt mit Keimen überschwemmt. Sie wird von vielen Autoren im Sinne Schaudinns Schizogonie genannt. Wir wollen sie in Uebereinstimmung mit der von Doflein gegebenen Terminologie als Agamogonie und die aus ihr hervorgehenden Sprößlinge als Agameten (= Merozoiten) bezeichnen (Fig. 24 VIII). Der Kern des Muttertieres teilt sich (Fig. 24 V) und nach Bildung zahlreicher Kerne (Fig. 24 VI) erfolgt der Zerfall des Parasiten in junge agame Sprößlinge (Merozoiten), die mit Zurücklassung eines Restkörpers unter lebhaften Bewegungen aus der alten Wirtszelle auswandern (Fig. 24 VII und VIII), um neue Darmzellen (Fig. 24 I) zu infizieren. Diese ungeschlechtliche Fortpflanzung kann sich verschiedentlich (4 bis 5 Tage lang) wiederholen, so daß zahlreiche Keime den Organismus überschwemmen und der Parasit damit eine pathogene Bedeutung erlangt (Antoinfektion).

In bestimmter Gesetzmäßigkeit (etwa am 5. bis 6. Tage) wechselt damit die seltener auftretende geschlechtliche oder propagative Fortpflanzung ab, deren Endzweck es ist, die jetzt zum Schutze in festen Hüllen (Sporen) eingeschlossenen Keime mit den Exkrementen des Wirtes an die Außenwelt zu befördern und sie auf andere Lithobien zu übertragen. Man nennt diese Vermehrung nach älterer Auffassung Sporogonie, nach neuerer Gamogonie. Die zunächst ungeschlechtlichen Agameten (Fig. 24 IX und X) entwickeln sich zu Geschlechtstieren, zu Gameten, die bei den Coccidien einen ausgesprochenen Dimorphismus aufweisen, der eine schon rein morphologische Unterscheidung in männliche und weibliche Individuen zuläßt (Fig. 24 XI c und XII e). Die eine Gruppe der Sprößlinge wächst zu ansehnlichen Kugeln heran, deren Plasma mit Reservenährstoffen dicht erfüllt ist, so daß sie den Eiern der Metazoen ähnlich werden. Sie

stellen die zukünftigen weiblichen Geschlechtstiere, die Makrogametocyten, dar (Fig. 24 XIb), die durch Abgabe von Kernsubstanz (Chromatinreduktion) zu geschlechtsreifen Makrogameten

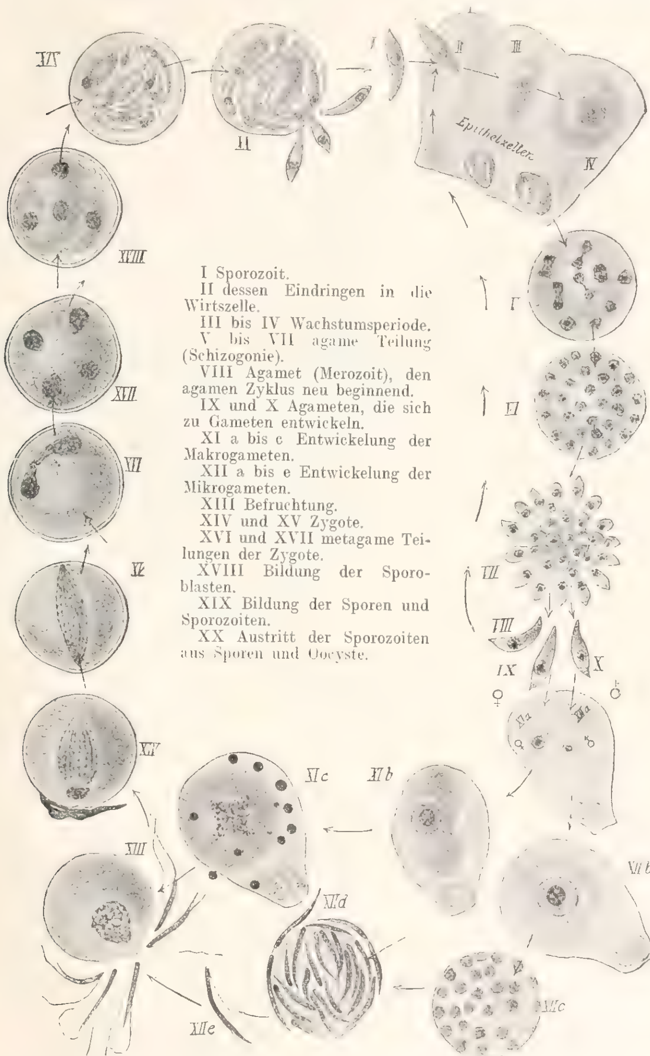


Fig. 24. Entwickelungskreis von Eimeria (Coccidium) Schubergi aus dem Darm von Lithobius forficatus. Nach Schaudinn. Aus Doflein.

werden (Fig. 24 XIc). Die andere Gruppe von Keimen wächst zwar auch bei Eimeria Schubergi zu kugeligen Gebilden heran, aber das Plasma bleibt durchsichtig und enthält keine Reservestoffe (Fig. 24 XIIb). Bei anderen Coccidien geht der Unterschied zwischen Makro- und Mikrogametocyten noch weiter, indem letztere auffällig klein bleiben und kaum die Größe der eingedrungenen Keimlinge überschreiten. Die Mikrogametocyten (Fig. 24 XIIb) unterliegen nach einer gewissen Entwickelungsperiode einer vielfachen Kernteilung (Fig. 24 XIIc); die Kerne rücken an die Oberfläche des Parasiten, umgeben sich mit einer zarten Schicht Plasma und schnüren sich schließlich als sichelförmige, längliche Körperchen unter Hinterlassung eines großen Restkörpers vom Mikrogametocyten ab (Fig. 24 XIId). Nachdem diese kleinen spermatozoenähnlichen Gebilde an ihrem Vorderende zwei Geißeln ausgebildet haben (Fig. 24 XIIe), sind sie zur lebhaften Bewegung und damit zur Aufsuchung der Makrogameten befähigt. Sie dringen als Mikrogameten in die Makrogameten ein, die ihnen einen Empfängnishügel entgegenwölben und sie scheinbar auf chemotaktischem Wege zu sich heranziehen (Fig. 24 XIII). Sobald ein Mikrogamet die Befruchtung vollführt hat, scheidet der Makrogamet sofort eine feste Hülle aus, um das Eindringen von weiteren Mikrogameten zu verhindern. Dieses Stadium der Kopulation wird als Zygote bezeichnet. Mit Bezug auf die derbe Cystenhülle und der Aehnlichkeit mit dem befruchteten Ei der Metazoen nennt man es auch Oocyste (Fig. 24 XIV). Reste von zugrunde gegangenen Mikrogameten haften oftmals noch längere Zeit der Cystenmembran an (Fig. 24 XIV).

Der Mikrogametenkern vereinigt sich mit dem des Makrogameten zur Befruchtungsspindel oder dem Syncaryon. Die Spindel ist sehr groß und nimmt die ganze Breite der Zelle ein (Fig. 24 XV). In der Zygote beginnt jetzt die propagative Fortpflanzung einzusetzen; indem durch mehrfache, sogenannte metagame Teilungen die Sporen (früher „Pseudonavicellen" genannt), gebildet werden. Man bezeichnet diesen Prozeß als Sporogonie im Gegensatz zu der oben erwähnten Schizogonie, die als ungeschlechtliche Vermehrung die Autoinfektion des Wirtes zur Folge haben kann.

Auf dem Stadium der Befruchtungsspindel (Fig. 24 XV) wird die Zygote mit den Exkrementen des Wirtes nach außen gebracht, so daß ihre weitere Entwickelung in der freien Natur unter reichlicher Sauerstoffzufuhr, die für die Bildung der Sporen und Sporozoiten von größerer Bedeutung zu sein scheint (von der Luft sorgfältig abgeschlossene Cysten entwickeln sich nicht weiter), stattfindet. Die große Befruchtungsspindel bildet zuerst zwei Tochterkerne (Fig. 24 XVI), die sich kurz darauf nochmals teilen und aus denen durch gleichzeitigen Zerfall des umgebenden Plasmas 4 Sporoblasten entstehen, die sich mit einer festen Hülle umgeben und nun Sporen genannt werden (Fig. 24 XVIII). Auch jetzt bleibt eine zentrale Plasmapartie als Restkörper zurück. Die Zygotenhülle (Fig. 24 XIV) ist schon ziemlich fest, wird aber bisweilen an Widerstandsfähigkeit von der Sporenmembran übertroffen. Die nach außen gebrachten Sporen können mit den Exkrementen des Wirtes völlig austrocknen, ohne daß ihre Infektionsfähigkeit leidet. In den vier Sporen teilt sich zur Weiterentwickelung der Kern. Die darauffolgende Plasmateilung führt unter Zurücklassung eines Restkörpers (Fig. 24 XIX) zur Bildung zweier sichelförmiger Keime, der Sporozoiten. Die weitere Entwickelung ist nur im Darmkanal eines anderen Wirtes möglich. Die reifen Cysten mit ihren Sporen werden mit der Nahrung von den Lithobien aufgenommen, und unter Einwirkung der Verdauungssäfte öffnen sich die Sporen und lassen die Sporozoiten frei, die dann aus einer besonderen Oeffnung der Cyste (Mikropyle) ausschlüpfen (Fig. 24 XX). Die sich lebhaft bewegenden Keime dringen in die Darmwand des Wirtes ein und setzen sich in den Epithelzellen fest, wo der soeben geschilderte Entwickelungsgang von neuem beginnt (Fig. 24 I u. II).

Das Kaninchencoccidium Eimeria Stiedae (Coccidium cuniculi oder oviforme). Die Kaninchen werden häufig von dieser Coccidiose heimgesucht, die verheerend tödliche Erkrankungen herbeizuführen vermag, so daß ganze Zuchten aussterben. Besonders die jungen Tiere erkranken nach der Infektion akut und sterben zumeist in kurzer Zeit. Man findet entweder die Leber oder den Darmkanal erkrankt. Die infizierte Leber zeigt weißliche, eiterähnliche, etwas vorspringende Knoten, die die Größe von Linsen, Erbsen und darüber (bis Nußgröße) haben. Die Knotenherde schimmern als weißliche Massen durch die dunkelrote Leberoberfläche, so daß sie leicht mit unbewaffnetem Auge erkannt werden können. Sie sind von einer Art Kapsel umhüllt, die als bindegewebige Abgrenzung gegen das Lebergewebe aufzufassen sind. Oftmals gehen von dieser Kapsel aus wurzelförmige, strangartige Fortsätze in die Gallenwege über. Schneidet man die Knoten durch, so kommt eine gelbkäsige, etwas schmierige

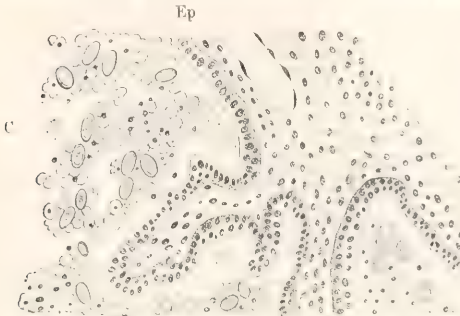


Fig. 25. Schnitt durch einen Coccidienknoten aus der Leber des Kaninchens. C Coccidien. Ep Epithel. Nach Thoma. Aus Doflein.

Masse zum Vorschein, die sich bei mikroskopischer Betrachtung als aus zahllosen Oocysten (früher Dauercysten genannt) bestehend erweist (Fig. 25C). Sie sind zuerst als Krankheitserreger erkannt und am häufigsten untersucht worden. Der Parasit zeigt im Cystenzustand eine gewisse flüssigkeit entleert werden. Die Sporenbildung (Fig. 26F bis J und 27B bis E) muß im Freien außerhalb des Wirtes unter Luftzutritt stattfinden. Die in den Cysten entstehenden Sporen bilden ebenfalls eine feste Membran mit Mikropyle (das sog. Stiedasche Körperchen oder

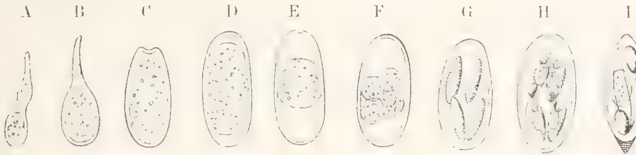


Fig. 26 A bis I. Eimeria Stiedae (Lindem.) aus der Leber des Kaninchens. A und B junge Stadien in Epithelzellen der Gallengänge. C, D und E befruchtete Oocysten. F, G, H Sporenbildung. I Spore mit Sporozoiden. Nach Balbiani. Aus Doflein.



Fig. 27 A bis E. Eimeria Stiedae (Lindem.). A befruchtete normale Oocyste aus der Gallenblase von Lepus cuniculus. B Beginn des Pyramidenstadiums. C Umwandlung der Sporoblasten in Sporen. D Bildung der Sporozoiten in den Sporen. E Ausschlüpfen der Sporozoiten; einer schlüpft gerade durch die Mikropyle der Oocyste. Nach Metzner. Aus Doflein.

Aehnlichkeit mit Nematodeneiern (Oxyuris), daher er auch von früheren Autoren Coccidium oviforme genannt wurde (Fig. 26 D bis F). Die Coccidien der Leber und der Epithelzellen der Gallengänge sind größer als die im Darm lebenden Schmarotzer. Sie haben durchschnittlich eine Länge von 36 bis 49 μ und eine Breite von 18 bis 24 μ, während die Darmparasiten im allgemeinen 24 bis 36 μ lang und 11 bis 23 μ breit sind. Eine dicke, doppelt konturierte Hülle, die an einem Pol etwas abgeflacht ist und nach innen gedellt sich erweist (Fig. 26C), umgibt den Parasiten. An der abgeflachten Stelle befindet sich ein kreisrundes Loch in der Cystenhülle, das durch einen Gallertepfropfen verschlossen ist und zurzeit als Mikropyle zum Ausschlüpfen der Sporozoiten dient (Fig. 27E). Die Cystenwand ist außerdem noch von einer Gallerthülle umgeben (Fig. 27A). Im Innern lagert eine grobkörnige, stark lichtbrechende Masse, in deren Mitte der Kern liegt. Auf jüngeren Stadien füllt der Parasit die Cyste völlig aus (Fig. 26C). Bereitet er sich jedoch zur Sporenbildung vor (Fig. 26D und E), so zieht sich das Plasma zu einer Kugel zusammen, wodurch der Parasit im weiten Abstand von der Schale zurückgezogen wird (Fig. 27A). Derartige Stadien findet man auch in der Leber und im Darm des Kaninchens, wohin sie mit der Gallen-

Knöpfchen). Man nennt die Sporen bei Eimeria Stiedae auch Sporoblasten, aus denen sich durch Zweiteilung unter Zurücklassung eines Restkörpers die keulen- oder kommaförmigen Sporozoiten entwickeln (Fig. 26J). Die ganze Sporogonie (Fig. 28, 1 bis 5) dauert im günstigsten Falle $2\frac{1}{2}$ Tage (Metzner). Im Durchschnitt wird sie in 4 Tagen vorsichgehen (Reich). Die Cysten können jedes Stadium des Austrocknens vertragen. Zur Neuinfektion müssen sie in den Darmkanal eines anderen Wirtes gelangen, wo das Auskriechen der Sporozoiten unter dem Einfluß des Pankreassaftes erfolgt. Die Sporozoiten schlüpfen zuerst durch die Mikropyle der Spore und dann durch die der Cyste aus (Fig. 27E). Die freien Keime sind 10 bis 15 μ lang und 4 μ breit. Das Vorderende ist abgerundet, das Hinterende etwas zugespitzt. Sie dringen sofort in die Epithelzellen des Darmes und der Gallengänge ein und wachsen hier in der bekannten Weise zu Schizonten von 20 bis 50 μ Länge und 20 bis 39 μ Breite heran. Ob sie von einer Cystenhülle umgeben sind, ist unsicher. Tatsächlich wird der Parasit von dem Inhalt seiner Wirtszelle durch eine zarte Membran getrennt. Ob diese aber ein Produkt der Zelle oder des Schmarotzers ist, konnte bislang nicht sicher festgestellt werden. Die jetzt eintretende vielfache Kernteilung besteht in einer Amitose,

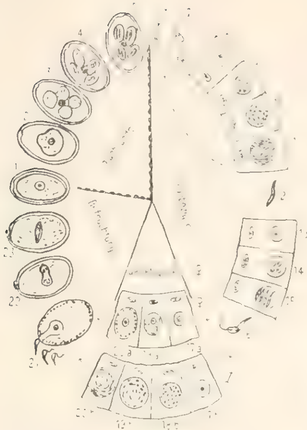


Fig. 28. Entwickelungskreis von Eimeria Stiedae. Sporogonie exogen (punktiert), Schizogonie, Gametogonie und Befruchtung endogen. Befruchtung oft erst im Darmlumen. Nach Reich.

da von Spindelfasern und Poldifferenzierungen nichts wahrzunehmen ist. Die Tochterkerne wandern an die Oberfläche des Schizonten und ordnen sich äquatorial an. Nach Beendigung dieser Prozesse zerfällt das Muttertier in zumeist 16 Sprößlinge (Schizogonie). Es werden aber auch ausnahmsweise größere Schizonten mit zahlreicheren Keimen gefunden. Diese als Merozoiten bezeichneten, schlanken, agamen Gebilde liegen in der Zelle zwiebelschalenartig angeordnet (Fig. 29). Sie lassen sich durch ihre sichelförmige,



Fig. 29. Agame Vermehrung von Eimeria Stiedae (Lindem.). Nach Limond. Aus Doflein.

an beiden Enden zugespitzte Gestalt und ihren Karyosomkern leicht von den keulenförmigen Sporozoiten und noch mehr von den gleich zu besprechenden Merozoiten, die die geschlechtliche Fortpflanzung einleiten und die am Vorderende eine Geißel besitzen (Fig. 28, 11), unterscheiden. Diese so entstandenen Keime verlassen die infizierten Zellen, zerstreuen sich im Darme oder in der Leber und wandern in neue Epithelzellen ein, um ihren ungeschlechtlichen Lebenszyklus von neuem zu beginnen (Autoinfektion des Wirtes). Das Eindringen eines Merozoiten in eine neue Zelle wurde neuerdings beobachtet (Reich). Der junge Parasit bohrte sich unter drehenden Bewegungen langsam in die Zelle ein, drehte sich mit dem Vorderende herum, um sich vermutlich abzukugeln. Der interessante Vorgang dauerte etwa 5 Minuten.

Nachdem sich mit der Zeit diese ungeschlechtliche Vermehrungsart (Schizogonie oder Agamogonie) erschöpft hat, treten geschlechtlich differenzierte Stadien (Gameten) auf, die sich aus ganz eigenartigen Merozoiten entwickeln und sich wesentlich von den durch Schizogonie sich fortpflanzenden Formen und von den Sporozoiten unterscheiden. Sie entstehen aus Schizonten, die sich nur in vier Merozoite teilen (Fig. 28, 13 bis 15), während bei der ungeschlechtlichen Fortpflanzung 16 Sprößlinge gebildet werden (Fig. 28, 11).

Wichtiger aber ist das Vorhandensein einer 4 bis 5 μ langen Geißel am Vorderende des Körpers (Fig. 30). Diese Geißel sitzt auf einem kleinen starren Borstenstift, der mit einem Basalkorn in Verbindung steht. Oftmals ist letzteres durch einen Rhizoplasten mit dem Kern verbunden. Sobald dieser geißeltragende Keim eine Epithelzelle des Wirtes berührt, wird die Geißel abgeworfen und der Parasit dringt mit dem borstenförmigen Fortsatz ein (nach Reich).

Durch dieses Vorkommen von geißeltragenden Merozoiten werden die Coccidien in noch nähere Verwandtschaft zu den Flagellaten gebracht, wie es ja auch schon durch die geißeltragenden Mikrogameten wahrscheinlich gemacht worden war. Möglicherweise stammen die Coccidien von protomonadinen Flagellaten ab (Hartmann). Trotzdem bleiben sie, mit den Gregarinen und Hämosporidien zusammen, unserer Meinung nach echte Sporozoen mit den charakteristischen Fortpflanzungserscheinungen, die der ganzen Klasse ihren Namen gegeben haben.

Aus den geißeltragenden Merozoiten entstehen die geschlechtlich unterschiedenen Makro- und Mikrogametocyten (Fig. 28, [illegible]). Der Entwickelungsprozeß wird unter dem Namen der Gametogonie zusammengefaßt.

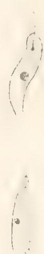


Fig. 30. Geißeltragende Merozoiten von Eimeria Stiedae. Nach Reich.

Die Frage ist noch unentschieden, warum nach Verlauf mehrerer Schizogonien plötzlich die geschlechtlichen Formen auftreten. Die durch obige Vermehrungsformen hervorgerufenen starken Zerstörungen der Darmepithelien entziehen möglicherweise den Parasiten die günstigen Existenzbedingungen, so daß sie zur Encystierung und Sporogonie schreiten. Möglicherweise entstehen aber auch im Darm des Wirtes Antitoxine, die die Schmarotzer zwingen, einen anderen Weg der Entwickelung einzuschlagen. Jedenfalls hören die Schizogonien um so früher auf, je stärker die Infektion ist.

Die Mikrogametocyten von Eimeria Stiedae

(Fig. 28, [19b]) sind verhältnismäßig groß und die Zahl der sich aus ihnen bildenden, mit zwei Geißeln versehenen Mikrogameten ist erheblich. Von den beiden am Vorderende befindlichen Geißeln ist die eine eine Schleppgeißel. Die Mikrogameten selbst sind kommaförmig und 2,0 bis 2,5 μ groß. Sie sprengen die Mikrogametocytenmembran und verlassen die Wirtszelle. Reduktionsteilungen konnten bislang an den Mikrogametocyten nicht mit Sicherheit nachgewiesen werden, obwohl es nach Reich den Anschein hat, als fänden sie kurz vor der Mikrogametenbildung statt.

Die Makrogametocyten sind unter anderem an den zahlreichen plastinoiden und chromatoiden Granula kenntlich, die in ihrem Plasma zerstreut liegen, später an die Oberfläche rücken und nach Reich die erste Cystenmembran des Makrogameten bilden. Vor der Ausbildung der zweiten Hälfte der bekanntlich doppelt-konturierten Membran tritt die Befruchtung ein (Fig. 28, [21]). Sie verläuft in ähnlicher Weise, wie sie bereits von anderen Coccidien beschrieben worden ist. Makro- und Mikrogameten, sowie die Befruchtungsstadien sind im Darm und in der Leber der infizierten Kaninchen zu finden. Die un-



Fig. 31. Makrogamet von Eimeria Stiedae. Nach Reich.

befruchteten Makrogameten sind leicht an ihrer kugeligen Form kenntlich; wenn sie befruchtet sind, werden sie oval, scheiden bald eine feste Membran aus und entwickeln sich zu Oocysten. Diese gelangen mit den Exkrementen ihres Wirtes nach außen und entwickeln die Sporen, deren Bildung eingangs bereits beschrieben wurde.

Der Inhalt der milchigen Herde der Coccidienknoten innerhalb der Kaninchenleber besteht größtenteils aus Entwickelungsstadien des Parasiten (Makro- und Mikrogametocyten, Befruchtungsstadien usw.), während die älteren käsigen Herde mehr Cysten enthalten. Stadien der ungeschlechtlichen Fortpflanzung, der Schizogonie, findet man nur zu Beginn der Infektion. Zumeist wandern die Parasiten auch in die Epithelien der Nasenschleimhaut ein, wodurch bei den erkrankten Kaninchen ein heftiger Nasenschleimausfluß hervorgerufen wird. Häufig sind sogar die Schleimhäute der Kopfhöhlen infiziert. Bei alten Kaninchen, die die Infektion überstanden haben, findet man in der Leber meist nur noch abgeheilte Knoten, während das Darmepithel völlig regeneriert ist.

Durch die mikroskopische Untersuchung der Exkremente erkrankter Tiere lassen sich die Oocysten oder Dauercysten der Coccidien leicht und zumeist in großer Menge nachweisen, so daß die Erkennung der Krankheit keine großen Schwierigkeiten bereitet. Wegen ihrer so außerordentlich festen, undurchlässigen Hülle besitzen sie eine große Dauerhaftigkeit, so daß sie noch lange Zeit, nachdem sie den Darm ihrer Wirte verlassen haben, geeignet sind, andere Kaninchen zu infizieren. Da es sich schwer verhindern läßt, daß kranke Tiere das gemeinsame Futter mit ihren Exkrementen beschmutzen, so kann ein einziges coccidienhaltiges Kaninchen einen ganzen Stall infizieren. Schleunige Entfernung der Fäkalien und Isolierung des erkrankten Tieres, das an seinen Durchfallserscheinungen auch ohne mikroskopische Untersuchung der Exkremente erkannt werden kann, sind die sichersten Mittel, um die Seuche bei ihrer Entstehung zu bekämpfen.

Die Nierencoccidien von Helix sind häufige Parasiten unserer Gartenschnecken (Helix nemoralis L. und hortensis Müll.), in denen sie wohl selten vergeblich gesucht werden. Wegen ihrer Größe eignen sich diese Coccidien ebenfalls vorzüglich zur Untersuchung (Fig. 23). Auch die meisten anderen Landschnecken beherbergen Coccidien, z. B. Helix hispida, arbustorum, fruticum, umbrosa, Lucinea Pfeifferi und gigantea usw.

Zerzupft man ein Stück der Niere in physiologischer Kochsalzlösung, so bemerkt man schon bei schwächerer Vergrößerung die in den Nierenzellen eingeschlossenen, großen Schmarotzer. Die Zellen haben sich unter dem Einfluß des heranwachsenden, kugeligen oder ovalen Parasiten stark vergrößert, auch ihr Kern hat eine beträchtliche Zunahme erfahren (Fig. 23). Außer diesen erwachsenen Coccidien wird man mitunter nicht nur Makrogameten und bewegliche, mit zwei Geißeln ausgerüstete Mikrogameten finden, sondern es sind auch Oocysten (100 μ im Durchmesser groß) und andere Stadien vorhanden, da die ganze Sporogonie in den Nierenzellen des Wirtes erfolgt.

Die Sporozoiten, deren Größe und Gestalt schwankt, dringen in die Epithelzellen der Niere ein, bekommen eine mehr ellipsoide Form und wachsen heran. Es treten karyokinetische Kernteilungen ohne Centrosomen auf. Am Schluß der Teilungen liegen 12 bis 16 Kerne im Plasma, die sich an der Oberfläche des Schizonten verteilen. Es ist sehr wahrscheinlich, daß bei anderen Formen auch multiple Kernvermehrungen stattfinden, wie es von Siedlecki, Laveran, Schaudinn usw. angegeben wurde. Der Zerfall des Parasiten in Merozoiten kann auf zweierlei Weise erfolgen (Moroff). Entweder verteilen sich die Kerne regellos an der Peripherie des Schizonten, wölben sich mit einer dünnen Plasmaschicht über die Oberfläche und wachsen aus dem Restkörper hervor. Die Nukleolen werden aus den Kernen während dieses Vorganges ausgestoßen. Ein Teil gelangt in den Restkörper, ein Teil bleibt in den Merozoiten. Diese Merozoiten haben demnach keine Nukleolen in den Kernen. Oder die Kerne ordnen sich gürtelförmig in der Mitte des Schizonten an und der Parasit zerfällt in Merozoiten, die wie die Sektoren einer Orange angeordnet sind. Die Kerne dieser Merozoiten enthalten ein oder zwei Nucleolen (Caryosome). Eine ähnliche Erscheinung wurde auch bei anderen Coccidien festgestellt, z. B. bei Cyclospora von Schaudinn, Adelea von Siedlecki, Perez, Moroff. Wahrscheinlich muß dieses Verhalten als ein geschlechtlicher Dimorphismus betrachtet werden, der häufig schon von Anfang der Schizogonie an festzustellen ist (Vergleich mit Gregarinen).

Möglicherweise sind aber auch manche dieser Angaben auf Verwechselungen mit Mischinfektionen zurückzuführen (siehe Reichenow und Schellack bei Adelea und Barrouxia). Im übrigen kann man aus dem Aussehen der Merozoiten nicht feststellen, welche von ihnen zu weiteren Schizonten und welche zu Makro- und Mikrogametocyten werden.

Die Gamogonie verläuft in folgender Weise. Die zu Makro- und Mikrogametocyten heranwachsenden Merozoiten können gleich groß oder in der Größe verschieden sein.

Die Mikrogametocyten nehmen wenig an Größe zu. Es werden auch keine Reservenährstoffe in ihnen aufgespeichert.

Die Kernteilungen verlaufen auf amitotischem Wege. Nachdem eine entsprechende Anzahl von Kernen gebildet ist, verdichtet sich ihr Chromatin zur Bildung der Mikrogameten. Letztere sind längliche Gebilde, vorn kurz zugespitzt, nach hinten schwanzartig spitz auslaufend. Am Vorderende bilden sich oft zwei lange Geißeln aus. Die fertigen Mikrogameten lösen sich vom Restkörper ab. Möglicherweise entstehen mitunter auch die Mikrogametenkerne bei einigen Coccidien durch multiplen Zerfall des Mutterkernes (Chromidienbildung), wie es von Schaudinn, Awerinzew usw. beschrieben wurde. Dieser Vorgang scheint jedoch nicht so häufig zu sein, wie man früher angenommen hatte, da auch neuerdings mehrfach, so z. B. durch Reichenow und Schellack bei Barrouxia schneideri Kernteilungen festgestellt wurden.

Die Makrogametocyten nehmen durch Ablagerung von Reservenährstoffen bedeutend an Größe zu. Reichliche Mengen von Chromatin werden vom Kern ausgestoßen (Chromatinreduktion, trophisches Chromatin). Dann wandert derselbe an die Peripherie des Parasiten. Der Mikrogamet dringt ein und vereinigt sich mit dem Kern des Makrogameten.

Nach der Befruchtung erfolgt die Sporogonie. Der Befruchtungskern (das Synkaryon) dehnt sich zu einer großen, den ganzen Parasiten durchsetzenden Spindel aus. Durch mehrfache Teilungen, die stark voneinander abweichen, da alle Uebergänge von direkten Kernteilungen bis zu ausgesprochenen Mitosen (Längsspaltung der Chromosomen, achromatische Fasern, Aequatorial- und Tochterplatten, aber keine Centrosomen) vorhanden sind, erfolgt die Bildung der Sporocystenkerne. Die Kerne rücken an die Oberfläche, wölben sich mit einer entsprechenden Menge Plasma vor und schnüren sich als Sporoblasten ab. In jedem Sporoblasten entstehen durch wiederholte Teilung vier Sporozoiten.

Bei manchen Nierencoccidien von Helix entwickeln sich in den großen Cysten bis zu 160 Sporen (Klossia helicina).

Systematische Uebersicht. Die Coccidien zerfallen nach Art ihrer Befruchtung in zwei natürliche Gruppen, die nach Léger den Wert von Ordnungen haben (Eimeridea und Adeleidea), die aber in Uebereinstimmung mit Lühe und Doflein auch als Familien betrachtet werden können.

I. Familie: Eimeridae (Lühe em. Léger).

Die gleich großen Makro- und Mikrogametocyten entwickeln sich getrennt voneinander (keine Kopulation). Aus je einem Mikrogametocyten entstehen zahlreiche, zumeist mit zwei freien Geißeln versehene Mikrogameten. Zahlreiche Gattungen, deren Entwickelungszyklus teilweise nur ungenügend bekannt ist.

1. Gattung: Cryptosporidium (Tyzzer) Cryptosporidium muris. Ein Coccidium aus dem Magen der Hausmaus, das eine im Gegensatz zu allen anderen Coccidien extrazelluläre Lebensweise führt. Alle Entwickelungsstadien verlaufen am Drüsenepithel des Magens. In der Cyste ist nur eine einzige Spore mit 4 Sporozoiten enthalten. Die Agameten dagegen zerfallen in 8 Keimlinge. Die Sporen öffnen sich bereits im Magen der kranken Maus, daher starke Autoinfektionen.

2. Gattung: Cyclospora (Aimé Schneider). Die Cyste enthält 2 Sporen mit je zwei Sporozoiten. Es lassen sich nach Schaudinn frühzeitig männliche und weibliche Agameten unterscheiden (Dimorphismus der Geschlechter).

Cyclospora caryolytica (Schaudinn) verursacht eine schwere, oftmals tödlich verlaufende Darmerkrankung des Maulwurfs. 5 bis 6 Tage nach der Infektion tritt die Krisis ein, bei der sehr viele Tiere zugrunde gehen. Ueberstehen sie dieselbe, so werden sie gesund, da Befruchtung und Sporenbildung ziemlich bei allen, den Maulwurfsdarm bewohnenden Parasiten gleichmäßig vorsichgehen, die dann als Dauerstadien den Darmkanal verlassen, so daß ungestört Epithelregenerationen eintreten können. Die Entwickelung von Cyclospora ist von Schaudinn eingehend untersucht worden. Der Schmarotzer ist ein Kernparasit in den Darmepithelzellen des Maulwurfes. Bereits die Agameten und ihre Fortpflanzung durch multiple Teilung weisen deutlich getrennte Geschlechtsformen auf. Die männlichen Agameten lassen stark lichtbrechende Körnchen in ihrem Innern erkennen. Sie wachsen bedeutend langsamer als die weiblichen Gameten heran, die schon nach 4 bis 5 Stunden fortpflanzungsfähig sind. Letztere besitzen auch ein durchsichtiges, körnchenloses Plasma. Auch die multiple Teilung ist bei beiden Geschlechtsformen verschieden. Die männlichen Agameten teilen sich nach Art einer superfiziellen Furchung. Es bleibt bei der Trennung der Keime kein Restkörper zurück. Die weiblichen Agameten dagegen wölben sich bei der Teilung knospenartig über das Muttertier empor und es ist ein deutlicher Restkörper nach der Trennung vorhanden. Die jungen männlichen Agameten haben weiterhin eine gedrungene Form und ihr Kern liegt im vorderen Abschnitt des Körpers. Umgekehrt sind die weiblichen Tiere schlanker gebaut und ihr Kern liegt im hinteren Drittel. Die Geschlechtsformen treten plötzlich am 4. bis 5. Tage auf. Befruchtung und Sporogonie verlaufen in der bekannten Weise. Es sind zweigeißelige Mikrogameten vorhanden. Der Kern der Makrogametocyten macht 2 Reifeteilungen durch.

3. Gattung: Caryospora (Léger). Die Oocyste enthält nur eine Spore mit 8 Sporozoiten. Agameten sind entweder oval oder kugelig. Caryospora simplex (Léger) im Darmepithel der Schildviper (Vipera aspis L.).

4. Gattung: Pfeifferinella (Wasielewski). Nur eine Spore mit ebenfalls 8 Sporozoiten. Pfeifferinella ellipsoides (Wasielewski) in Planorbis cornuta.

5. Gattung: Isospora (Aimé Schneider) (= Diplospora). 2 Sporen mit je 4 Sporozoiten. Möglicherweise gehören die hier vereinigten Coccidien zu verschiedenen Gattungen. Isospora vara (Aimé Schneider) kommt in der Nacktschnecke Limax cinereo-niger vor. Die beiden birnenförmigen Sporen enthalten je vier Sporozoiten.

Isospora bigemina (Stiles) kommt beim Hund, Katze und Iltis im Epithel und im Innern der Darmzotten vor. Vereinzelte Fälle von Coccidiose des Menschen werden ebenfalls auf diese Art zurückgeführt.

Isospora Lacazei (Labbé) im Darm des Sperlings und seiner Verwandten. Verursacht akute Darminfektionen von bisweilen schwerer Natur.

Isospora Lieberkühni (Labbé) ist ein Parasit der Frösche. Die Sporozoiten leben anfangs in den Darmepithelzellen, verlassen aber schließlich diese und dringen in die Blutbahn ein, um von dort aus eine allgemeine Infektion des Organismus (Lunge, Leber, Milz, Nieren usw.) herbeizuführen.

Isospora Mesnili (Sergent) ist ein Kernparasit in den Darmepithelzellen von Chamaeleon vulgaris.

6. Gattung: Eimeria (Aimé Schneider). 4 Sporen mit je 2 Sporozoiten.

a) Untergattung: Goussia. Sporen zweiklappig, kugelig oder oval. Oeffnen sich erst im Darm des neuen Wirtes.

Eimeria Schubergi (Schaudinn), Darm von Lithobius forficatus.

Außerdem kommen im Darm dieses Tausendfußes noch drei andere Coccidienarten vor, Eimeria lacazei, Adelea ovata und Barrouxia schneideri. Vorsicht beim Studium ist anzuempfehlen, damit die Zeugungskreise nicht durcheinander geworfen werden.

b) Untergattung: Eimeria s. str. Sporen nicht zweiklappig. Die Sporozoiten treten durch eine Oeffnung an einem Pol (Mikropyle) der Spore aus.

Eimeria falciformis (Eimer). Darm der Hausmaus. Verursacht oftmals seuchenartige Erkrankungen.

Eimeria Stiedae (Lindm.). Dünndarm und Leber des Kaninchens (Lepus cuniculus domesticus).

Hierher auch die rote Ruhr des Rindes, deren Erreger von den meisten Forschern für identisch mit Eimeria Stiedae gehalten wird. In den Epithelzellen des Darmes. Schwere Fälle enden in 2 Tagen tödlich. Mortalität 2 bis 4%.

Eimeria avium (Coccidium tenellum) (Silvestrini und Rivolta). Im Darmepithel von Hühnern, Gänsen, Enten, Truthühnern, Fasanen, Pfauen; ruft schwere Epidemien hervor. Die Sterblichkeit beträgt 60 bis 70%; vielfach gehen alle Tiere zugrunde.

Eimeria truncata (Raill. und Lucet). In den Harnkanälchen der Gans. Eimeria Pfeifferi (Labbé). Im Darm der Taube.

c) Untergattung: Orthospora.

Der Makrogamet umgibt sich schon vor der Befruchtung mit einer Cystenhülle. Parasiten im Darmepithel der Amphibien.

Eimeria salamandrae (Steinhaus). Im Darmepithel von Salamandra maculosa. Häufig sitzt der Parasit im Kern der Epithelzelle.

Eimeria ranarum (Labbé), im Dünndarm von Rana esculenta.

d) Untergattung: Paracoccidium.

Die Sporenhülle wird nach Ausbildung der Sporozoiten wieder aufgelöst und letztere liegen frei in der Oocyste.

Eimeria Prevati (Laveran und Mesnil). Findet sich im Darm von Rana esculenta.

e) Untergattung: Crystallospora (Labbé).

Die Sporen haben die Form einer Doppelpyramide.

Eimeria crystalloides (Thélohan). Lebt im Darmepithel von Motellaarten.

Die Gattung Eimeria bildet die bei weitem umfangreichste Gruppe der Coccidien, so daß es hier nur möglich war, einige wichtige Vertreter anzuführen. Obwohl die Gattung auch bei den Wirbellosen vertreten ist, scheint sie doch ihre Hauptverbreitung bei den Wirbeltieren zu finden, bei denen sämtliche Klassen in Mitleidenschaft gezogen werden. Unter den Haustieren rufen ihre Vertreter oft schwere und tödliche Seuchen hervor. Möglicherweise ist dieses auch unter den freilebenden Wirbeltieren der Fall, nur würden wir darüber nicht genügend orientiert sein. Jedenfalls scheinen die Vertreter dieser Gruppe auch bei Seevöglen und Fischen in großer Zahl vorzukommen.

7. Gattung: Barrouxia (Schneider).

Die Vertreter dieser Gruppe leben im Darm von Myriopoden und Wasserinsekten, z. B. Nepa cinerea. In der Oocyste finden sich zahlreiche Sporen, jede Spore enthält aber nur einen großen Sporozoiten.

Barrouxia ornata (Schneider) lebt im Darmepithel von Nepa cinerea, dem Wasserskorpion, und zeichnet sich durch große Agameten und Gameten aus.

Barrouxia schneideri (Bütschli emend. Schellack und Reichenow). Im Darmepithel von Lithobius forficatus.

8. Gattung: Caryotropha (Siedl.). Die Agameten dieser Gruppe entwickeln sich nicht wie gewöhnlich durch direkte Teilung des erwachsenen Coccids, sondern dieses teilt sich vorerst in eine Anzahl „Agametoblasten“ und aus diesen gehen erst durch entsprechende Teilung Bündel junger Agameten hervor.

Die Gametocyten pflegen vor der Befruchtung nicht zusammenzutreten. Während die Makrogametocyten sich direkt zu Makrogameten entwickeln, durchlaufen die Mikrogametocyten ebenfalls ein Mikrogametoblastenstadium, ehe sie sich zu Mikrogameten entwickeln. Die Oocyste beherbergt ungefähr 20 Sporen mit je 12 Sporozoiten.

Caryotropha Mesnili (Siedlecki) aus der Leibeshöhle des marinen Polychaeten Polymnia nebulosa. Sie lebt in den Spermatogonien des Wirtstieres.

9. Gattung: Klossiella (Smith und Johnson).

Klossiella muris (Smith und Johnson) als einziger Vertreter dieser Gattung lebt in der Niere der Maus. Genauere Untersuchung fehlt.

10. Gattung: Angeiocystis (Brasil).

Angeiocystis audouiniae (Brasil) kommt parasitär in Anneliden (Cirratuliden) vor. Ist bemerkenswert durch seine langgestreckten, monocystisähnlichen Agameten.

III. Familie: Adeleidae (Lühe).

Microgametocyten in der Regel bedeutend kleiner als die Makrogametocyten. Es findet (oftmals schon auf jungen Stadien) eine Kopulation zwischen ihnen statt, resp. die Stadien legen sich aneinander. Die Mikrogametocyten teilen sich stets nur in 4 Mikrogameten, die zumeist keine Geißeln ausbilden, sondern sich durch wurmförmige Bewegungen den Makrogameten nähern und sich in sie einbohren. Erst nach der Befruchtung scheidet der Makrogamet eine Cystenhülle ab. Bereits während der ungeschlechtlichen Fortpflanzung sind die Agameten oftmals geschlechtlich differenziert, doch wird dieser geschlechtliche Dimorphismus neuerdings von Schellack und Reichenow (1913) für einige Formen angezweifelt.

1. Gattung: Legerella (Mesnil). Die Agameten sind geschlechtlich differenziert. In der Oocystenhülle liegen bei dieser Gattung keine Sporen, sondern direkt ein Bündel von Sporozoiten.

Legerella nova (Aimé Schneider) lebt in den Malpighischen Gefäßen von Glomerisarten. Die mit doppelter Wand versehene Oocyste enthält ca. 30 bis 40 Sporozoiten. Die Agameten bestehen aus größeren weiblichen Formen, die in ca. 30 Sprößlinge zerfallen und aus kleineren männlichen, die nur 6 bis 8 Keime enthalten. Es kommen 4 Mikrogameten zur Ausbildung.

2. Gattung: Adelea (Aimé Schneider).

Mit geschlechtlichem Dimorphismus der Agameten (siehe dagegen Schellack und Reichenow). Die Cyste enthält 4 Sporen mit je zwei Sporozoiten. Kommen vorwiegend in Arthropoden vor.

Adelea ovata (Aimé Schneider) aus dem Darm von Lithobius forficatus.

Bemerkenswert ist auch diese Form durch die großen und kleinen Individuen, die bereits während der Schizogonie auftreten und sich erst nach zahlreichen Generationen zu Gameten ausbilden. Die großen weiblichen Gameten teilen sich in 20 bis 40 Keime unter Zurücklassung eines Restkörpers. Diese bilden sich zu Makrogametocyten um. Zu diesem Zweck müssen sie vorher in neue Zellen einwandern. Durch einen Kernreduktionsprozeß sollen sie sich in Makrogameten umwandeln. Sie sprengen die Zelle und fallen in das Lumen des Darmkanals. Die kleineren männlichen Formen teilen sich, ohne einen Restkörper zu hinterlassen, in etwa zwölf Nachkommen, die sich nochmals ungeschlechtlich vermehren können, oder die sich direkt zu Mikrogametocyten entwickeln. Auch sie fallen in das Darmlumen des Wirtes. Sie suchen dort die Makrogametocyten auf und setzen sich an sie fest. Jetzt erst kommt es zur Ausbildung der Mikrogameten (4 an der Zahl), die diesen Entwickelungsprozeß direkt am Makrogametocyten durchmachen. Einer der vier Mikrogameten dient zur Befruchtung, nachdem der Makrogametenkern eine Reifeteilung durchlaufen und gewisse Kernsubstanzen ausgestoßen hat, die anderen drei gehen zugrunde. In der Oocyste liegen zahlreiche Keime (Sporen), die 2 Sporozoiten und ebenfalls einen großen Restkörper enthalten.

Adelea Mesnili (Perez). Geschlechtlicher Dimorphismus der Agameten ist nicht sicher nachgewiesen. Leben im Fettkörper der Motte Tineola biseliella. Es gibt zahlreiche Adeleaidae, deren Entwickelungszyklus noch nicht genauer bekannt sind.

3. Gattung: Klossia (Aimé Schneider).

Klossia helicina (Aimé Schneider) wird häufig in der Niere von Helix nemoralis und hortensis, hispida usw. und in Luccinea Pfeifferi, Succinea gigantea gefunden. Ueberhaupt sind die Klossia-Arten sämtlich Parasiten von Mollusken.

4. Gattung: Orcheobius (Schuberg und Kunze).

Langsgetreckte, wurmförmige Gametocyten, im übrigen ganz den Klossiaarten ähnlich.

Orcheobius herpobdellae (Schuberg und Kunze) ist ein Parasit des Herpobdellahodens (Herpobdella atomaria). Geschlechtliche Differenzierung der Agameten ist nicht nachgewiesen. Die Schizogonie findet innerhalb der Cytophoren des Hodens statt. Am Schluß dieser Periode werden die Keime von den Lymphocyten des Hodens aufgenommen, in denen sie sich zu großen Gametocyten entwickeln. Die Makrogametocyten sind sehr groß, monocystisähnlich aber unbeweglich. Die aus ihnen hervorgehenden Makrogameten haben eine Länge von 780 μ; die Mikrogametocyten, aus denen 4 zweigeißelige Mikrogameten hervorgehen, sind 50 μ lang. Die kugeligen Sporen enthalten wie bei Klossia 4 Sporozoiten.

In Uebereinstimmung mit Doflein möge hier eine kurze Besprechung der Hämogregarinen folgen, die zu der Familie der Adeleidae in naher Verwandtschaft stehen.

Hämogregarinen.

Echte Coccidien, die in die Blutbahn ihrer Wirte geraten und zu Parasiten der Blutkörperchen geworden sind. Sie schließen sich direkt an die Familie der Adeleidae an. Einige Gattungen werden neuerdings von ihnen abgetrennt (Hämoproteus, Leucocytozoon usw.) und mit den Hämosporidien zusammen wegen ihrer Trypanosomenähnlichkeit zu den Flagellaten gestellt (siehe den Artikel „Flagellata").

Die teils gregarinen- und teils coccidienähnlich aussehenden Parasiten leben innerhalb der roten, mitunter auch der weißen Blutkörperchen von Wirbeltieren (in sämtlichen Klassen). Sie sind formbeständig wie die Gregarinen, an die sie auch durch ihre längliche, wurmförmige Gestalt und durch die Art ihrer Körperbewegungen erinnern. Das bei den Hämosporidien charakteristische Pigment scheint bei den Hämogregarinen zu fehlen.

Die Entwickelungsgeschichte von Haemogregarina Stepanowi aus dem Blute der europäischen Sumpfschildkröte (Emys orbicularis) ist eingehender bekannt geworden, weshalb wir sie unseren Betrachtungen zugrunde legen wollen (Fig. 32, 1 bis 21).

Die ungeschlechtliche Vermehrung erfolgt im Knochenmark der Schildkröte. Der Parasit wächst in dem Blutkörperchen heran, bis er es nahezu ausfüllt und es erfolgen zahlreiche Kernteilungen (Fig. 1). Aus dieser Schizogonie gehen Merozoiten hervor (Fig. 2), die das alte Blutkörperchen verlassen und sofort in neue eindringen, um dort heranzuwachsen (Fig.

3—5). Dabei biegt sich das Hinterende als kleines schwanzartiges Gebilde um und rückt als zweiter Schenkel an dem Vorderende des Parasiten entlang, bis beide Hälften des Tieres gleichlang sind (Fig. 5). Eine zarte Hüllmembran umgibt die Tiere innerhalb des Blutkörperchens. Anfangs werden bis zu 24 Merozoiten gebildet, bei älteren Infektionen sinkt ihre Zahl auf 4 bis 6 (Fig. 7).

Nach etwa vier Monaten beginnt die Bildung geschlechtlich differenzierter Formen. Während die ungeschlechtliche Vermehrung nur im Knochenmark vor sich ging, zerfallen nun auch die im peripheren Blut befindlichen Hämogregarinen in Merozoiten. Sobald diese in neue Blutkörperchen eingedrungen sind, zeigen sie ein von der vorhergehenden, ungeschlechtlichen Generation abweichendes Verhalten. Sie werden nicht zweischenkelig, sondern wachsen zu ovalen Gebilden heran (Fig. 9), die sich mit größeren Mengen von Volutin beladen. Sie sind durchweg kleiner als die ungeschlechtlichen Formen; ebenfalls trifft dieses für die aus ihnen entstehenden Teilprodukte (2 bis 9 an Zahl) zu (Fig. 10). Diese jungen Keime wandern als Gametocyten in neue Blutkörperchen ein. Bei einer Anzahl von ihnen bleibt das Volutin erhalten und diese, mit Reservenährstoffen beladenen Stadien werden zu

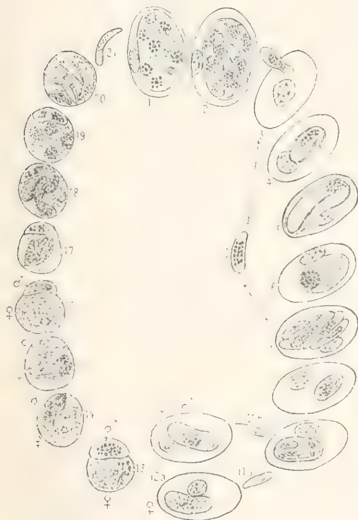


Fig. 32. Zeugungskreis von Haemogregarina Stepanowi. Erklärung der einzelnen Figuren im Text. Nach Reichenow.

Makrogameten; bei den anderen geht es verloren und der Kern wird sehr chromatinreich und größer. Es sind die Mikrogametocyten (Fig. 12a und b).

Zur Weiterentwickelung dieser geschlechtlich differenzierten Formen muß ein Wirtswechsel erfolgen. Der zweite Wirt für die Hämogregarine der Sumpfschildkröte ist der Rüsselegel Phacobdella catenigera. In dem resorbierenden Darmabschnitt dieses Egels werden die Blutkörperchen aufgelöst und die Parasiten frei. Die Makrogameten heften sich an die Darmwand fest, und runden sich ab; es tritt an jeden ein Mikrogametocyt heran und beide umgeben sich mit einer Membran (Fig. 13 und 14). Der Mikrogametocyt (♂) teilt sich in vier Mikrogameten, von denen einer in den Makrogameten eindringt und die Befruchtung vollführt. Es entsteht eine Befruchtungsspindel, die durchaus coccidienähnlich ist (Fig. 15). Drei Kernteilungen folgen aufeinander und es werden in der Oocyste 8 Sporozoiten gebildet (Fig. 17 bis 20). Diese sind niemals in Sporenhüllen eingeschlossen, sondern liegen frei in der Cyste (Fig. 20). In ihr liegt wie bei den Coccidien ein Restkörper. Sobald die Sporozoiten frei werden (Fig. 21), wandern sie durch das Darmepithel in die umgebenden Bluträume und in das Rückengefäß des Egels, um von dort bei erneutem Blutsaugen in den Rüssel und in die Saugwunde der Schildkröte zu gelangen. Wie die Parasiten aus dem Rückengefäß in den Rüssel gelangen, ist unklar.

Dieser Entwickelungsgang beweist, daß die Haemogregarina Stepanowi ein echtes Coccidium (Typus der Adeleiden) ist und nicht mit trypanosomenähnlichen Formen verglichen werden kann. Der Wirtswechsel und der Mangel der Sporenhülle weist auf das gleiche Verhalten bei den Hämosporidien hin, so daß diese Gruppe durch die Hämogregarinen mit den übrigen Telosporidien, den Coccidien und Gregarinen, aufs innigste verbunden erscheint und kaum von ihnen ohne Gewalt zu trennen ist.

Die meisten genauer untersuchten Hämogregarinen bieten mit geringen Abweichungen, die sich zumeist auf die geschlechtlichen Vorgänge beziehen, dasselbe Entwickelungsbild dar.

So z. B. bei der Eidechsenhämogregarine Karyolysus lacertarum, deren zweiter Wirt eine Milbe (Gamaside) ist. Es werden nur zwei Mikrogameten gebildet. Bemerkenswert ist bei dieser Hämogregarine, daß der befruchtete Makrogamet zu einem beweglichen Ookineten wird (Uebereinstimmung mit den Hämosporidien), der in die Leibeshöhle und von hier aus in die Eier der Milbe eindringt. In frisch abgelegten Milbeneiern können diese großen Ookineten gefunden werden, die nach ihrem Eindringen in das Ei große Mengen Volutin aufgespeichert haben. Während sich der Embryo entwickelt, kugeln sich die Ookineten ab und umgeben sich mit einer Membran. Sie werden dadurch zu Oocysten. In der Milbenlarve liegen die letzteren in der Leibeshöhle; es hat bereits in ihnen die Sporogonie begonnen. Die reifen Cysten enthalten neben dem Restkörper 20 bis 30 Sporozoiten. Sie öffnen sich nur, wenn sie in den Darm einer Eidechse gelangen, d. h. wenn diese die Milben fressen. Die frei gewordenen Sporozoiten durchdringen das Darmepithel der Eidechse und gelangen mit dem Blutstrom in die Kapillaren von Milz, Leber, Lunge, wo die ungeschlechtliche Generation wieder zur Entwickelung kommt.

Auch die Entwickelung der Säugetierhämogregarinen scheint ähnlich zu verlaufen (Reichenow).

Bei dem im Körper der Ratte lebenden Hepatozoon perniciosum findet die ungeschlechtliche Vermehrung in den Leberzellen statt (coccidienähnlich). Ein Teil der Merozoiten gelangt in den Blutkreislauf und wird von den Lymphocyten aufgenommen. Auf diese Weise werden ursprüngliche Leberzellenparasiten zu Schmarotzern in Blutzellen. Die Parasiten umgeben sich mit einer Hülle und entwickeln sich zu den Gametocyten. Die geschlechtliche Entwickelung erfolgt in der an der Ratte blutsaugenden Milbe Lelaps echidninus und scheint mit der von Karyolysus in den wesentlichen Punkten übereinzustimmen. Eine Infektion der Milbeneier findet jedoch nicht statt.

Der Zeugungskreis von manchen dieser Formen stimmt völlig mit dem der Coccidien überein. Bei manchen Hämogregarinen scheint ein Zwischenwirt überhaupt zu fehlen, so daß die geschlechtliche Entwickelung in demselben Wirt stattfinden muß und die Cysten durch den Darm entleert werden. Dadurch würde eine noch größere Uebereinstimmung mit den Coccidien hergestellt, so daß die Hämogregarine nichts anderes als ein ins Blut übergewandertes Darmcoccidium sein würde.

Als Zwischenwirt der Hämogregarinen der Säugetiere kommen außer Milben auch Läuse und möglicherweise Flöhe in Frage.

Es werden drei Gattungen, Haemogregarina, Karyolysus und Hepatozoon unterschieden, die leicht durch den Kern der Cysten und die Anzahl der Sporozoiten auseinandergehalten werden können.

Gattung: Haemogregarina (Danilewsky). Die ungeschlechtliche Generation lebt hauptsächlich in Schildkröten, daneben auch in Krokodilen, Fischen usw., die geschlechtliche in Rüsselegeln und Zecken.

Haemogregarina stepanowi (Danilewsky) in der europäischen Sumpfschildkröte.

Haemogregarina laverani (Limond) in Cryptopus granosus.

Haemogregarina crocodilinorum (Börner) in Crocodilus frontatus.

Gattung: Karyolysus (Labbé).

Sie üben eine zerstörende Wirkung auf den Kern ihrer Wirtszelle aus. Die ungeschlechtliche Generation lebt vornehmlich in Eidechsen, kommt aber auch in Schlangen vor.

Karyolysus lacertarum (Danilewsky). Wirte: Lacerta muralis, agilis, viridis und ocellata.

Karyolysus viperini (Billet) in Tropidonotus viperinus.

Gattung: Hepatozoon Miller (Leucocytogregarine Porter).

Die ungeschlechtliche Entwickelung findet in Säugetieren statt, die geschlechtliche in Milben (Zecken und Gamasiden), Läusen und höchstwahrscheinlich auch Flöhen.

Hepatozoon perniciosum im Blut der Ratten. Die einzige Hämogregarine, von der man sicher weiß, daß sie pathogen wirkt. Die infizierten Ratten erkranken unter allen Zeichen einer schweren Anämie. Von 16 experimentell infizierten Ratten starben 8. Vermutlicher Ueberträger: die Laus Hämatopinus spinulosus. Zahlreiche Hepatozoen in Raubtieren, Insektenfressern und Beuteltieren.

Als Anhang die Gattung: Lankesterella (Labbé).

Finden sich in Amphibien, z. B. in Rana esculenta und Triton cristatus. Allen Stadien fehlt eine Membran. Rosettenförmige Schizonten. Erhebliche Abweichungen im Bau und Entwickelungszyklus gegenüber anderen Gattungen, so daß ihnen möglicherweise eine andere Stellung im System der Einzelligen zukommen dürfte.

3. Ordnung: **Hämosporidia** Danilewsky em. Schaudinn.

(Siehe den Artikel „Flagellata".)

Die Hämosporidien zeigen viel übereinstimmendes mit Coccidien, mit denen sie durch die Hämogregarinen nahe verbunden sind. Aus diesem Grunde hat Doflein beide Ordnungen, Coccidien und Hämosporidien, zur Gruppe der Coccidiomorphen vereinigt.

Neuerdings werden von manchen Forschern die Hämosporidien zu den Flagellaten gestellt, mit denen sie zwar gewisse verwandtschaftliche Eigenschaften besitzen, von denen sie sich aber durch wichtige allgemeine Merkmale unterscheiden. Man muß mit Doflein gegen die Vereinigung der Hämosporidien mit den Trypanosomen zu der Gruppe der Binucleaten einer Meinung sein, daß man aus dem gemeinsamen Vorkommen eines Blepharoplasten bei zwei, im übrigen stark verschiedenen Protozoengruppen, keine verwandtschaftlichen Schlüsse zu ziehen berechtigt ist.

Die Hämosporidien sind echte Zellschmarotzer. Daß sie keine beschalten Sporen bilden, hängt wohl mit ihrer Lebensweise zusammen; sie befinden sich infolge eines Zwischenwirtes zu keiner Zeit ihres Lebenszyklus außerhalb des Wirtskörpers. Sie weichen aber auch dadurch von den Coccidien ab, daß sie teilweise amoboide Bewegungen ausführen können. Sie leben in den roten Blutkörperchen der Wirbeltiere, die sie zerstören. Am bekanntesten sind die Hämosporidien des Menschen, die die als Malaria oder Wechselfieber bekannte Krankheit erzeugen und die mit regelmäßigen und eigentümlichen Fiebererscheinungen einhergeht. Als Erreger sind drei, als verschiedene Species aufgefaßte Arten bekannt geworden.

1. Der Tropica - Parasit (Plasmodium praecox, Laverania malariae). Die kleinste der drei Formen. In einer einzigen Oocyste entwickeln sich ungefähr 10000 Sporozoiten. Entwickelung im Körper der Anopheles dauert 8 Tage bei einer Außentemperatur von mindestens 18° C. Der Parasit erzeugt die gefährlichste, hauptsächlich in den Tropen vorkommende Form der Malaria (Perniciosa, Tertiana maligna, Quotidiana, Tropica).

2. Der Tertiana-Parasit (Plasmodium vivax). Der Parasit ist sehr groß und füllt das ganze Blutkörperchen aus. Die Entwickelung in der Anopheles dauert acht Tage bei einer Außentemperatur von 28 bis 30° C. Kommt in den Tropen, Subtropen und der gemäßigten Zone vor. Er ist weniger gefähr-

lich als die Tropica und erzeugt das Tertianfieber.

3. Der Quartana-Parasit (Plasmodium malariae). Die Blutkörperchen werden wenig geschädigt. Die Entwickelung in der Anopheles geht schon bei einer Temperatur von 14 bis 15° C vor sich. Erzeugt die Quartana und kommt am nördlichsten von allen drei Formen vor. Als Ueberträger der Plasmodien sind die Anophelesarten festgestellt, die in den Tropen unter den Namen Moskitos, in Italien als Zanzare bekannt sind. In Europa ist am meisten Anopheles claviger verbreitet. Andere Arten von Plasmodien leben in Vögeln (Vogelmalaria). Eine sehr verbreitete Rinderkrankheit, das „Texasfieber", wird ebenfalls auf ein Hämosporidium (Babesia [Piroplasma] bigemina) zurückgeführt, das aber vielleicht auch zu den Flagellaten gehört.

II. Unterklasse: **Cnidosporidia** (= **Neosporidia**).

Sporozoen mit allen Merkmalen ihrer Klasse (Parasiten, osmotische Aufnahme flüssiger Nah-

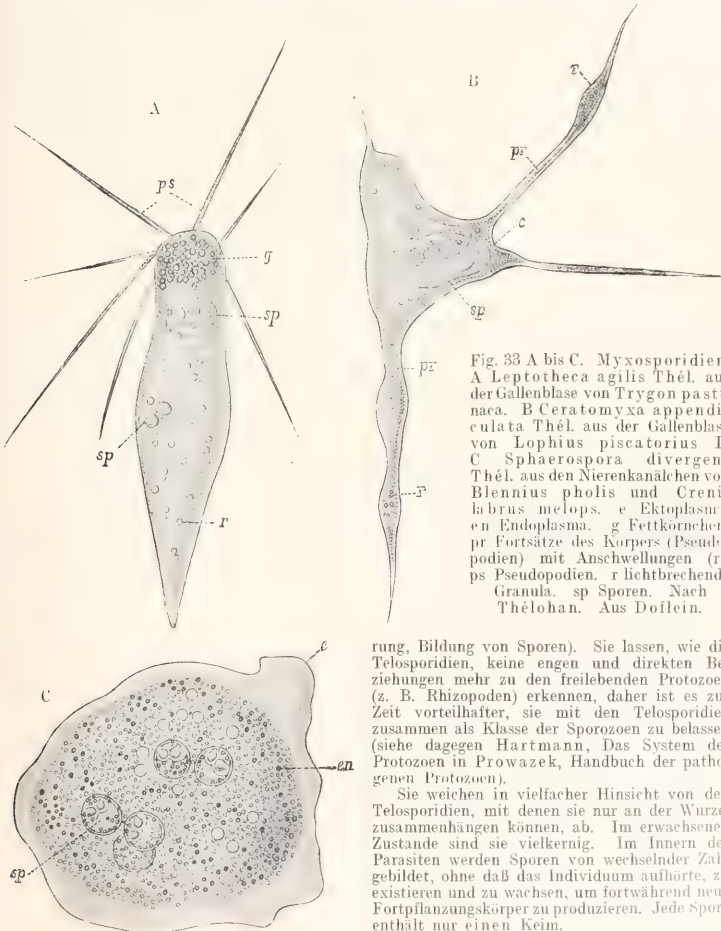


Fig. 33 A bis C. Myxosporidien. A Leptotheca agilis Thél. aus der Gallenblase von Trygon pastinaca. B Ceratomyxa appendiculata Thél. aus der Gallenblase von Lophius piscatorius L. C Sphaerospora divergens Thél. aus den Nierenkanälchen von Blennius pholis und Crenilabrus melops. e Ektoplasma. en Endoplasma. g Fettkörnchen. pr Fortsätze des Körpers (Pseudopodien) mit Anschwellungen (r). ps Pseudopodien. r lichtbrechende Granula. sp Sporen. Nach Thélohan. Aus Doflein.

rung, Bildung von Sporen). Sie lassen, wie die Telosporidien, keine engen und direkten Beziehungen mehr zu den freilebenden Protozoen (z. B. Rhizopoden) erkennen, daher ist es zur Zeit vorteilhafter, sie mit den Telosporidien zusammen als Klasse der Sporozoen zu belassen (siehe dagegen Hartmann, Das System der Protozoen in Prowazek, Handbuch der pathogenen Protozoen).

Sie weichen in vielfacher Hinsicht von den Telosporidien, mit denen sie nur an der Wurzel zusammenhängen können, ab. Im erwachsenen Zustande sind sie vielkernig. Im Innern des Parasiten werden Sporen von wechselnder Zahl gebildet, ohne daß das Individuum aufhörte, zu existieren und zu wachsen, um fortwährend neue Fortpflanzungskörper zu produzieren. Jede Spore enthält nur einen Keim.

Bei den Gewebsschmarotzern wird jedoch mit dem Zerfall des Parasiten in Sporen das Ende des vegetativen Individuums herbeigeführt (wie bei den Telosporidien). Der Entstehung der Sporen geht ein Zellenstadium voraus, das Pansporoblastenstadium, das für die gesamte Gruppe charakteristisch ist. Es werden in einem Parasiten zumeist mehrere bis zahlreiche Pansporoblasten gebildet. Diese zerfallen in Sporoblasten, aus denen sich die Sporen entwickeln. Diese letzteren sind das charakteristische Kennzeichen der Gruppe, wonach sie ihren Namen erhalten hat. Es sind eigenartige Fortpflanzungskörper (Cnidosporen), die zumeist eine feste, entweder einheitliche oder 2 bis 3 klappige Schale haben, in deren Innern mehrere Kerne (wenigstens 4) und 1 bis 4 Polkapseln liegen. Diese sind nesselkapselartige Bildungen mit handschuhfingerförmig eingestülpten Polfaden, der zumeist spiralig eingerollt in der Kapsel liegt und unter Einfluß verschiedener Agentien ausgestülpt wird. Für die Ordnung der Sarkosporidien sind vorläufig die Polkapseln nicht mit Sicherheit nachgewiesen worden, obwohl ihr Vorkommen mehrfach behauptet und teilweise auch wahrscheinlich gemacht ist. Möglicherweise sind in dieser Gruppe die Polkapseln degeneriert und teilweise rückgebildet, resp. ganz zum Verschwinden gebracht. Von den vier in der Spore enthaltenen Kernen gehören in der Regel zwei dem jungen Keime (Amöboidkeim) an, ein Teil spielt bei der Bildung der Polkapseln und der Schale eine Rolle.

Die Verwandtschaftsverhältnisse der Cnidosporidia sind noch recht unklar. Es scheinen aber zwischen Telo- und Cnidosporidien Zwischenformen vorzukommen, die auf eine nähere Verwandtschaft zwischen beiden Abteilungen hindeuten. Coccidien und Mikrosporidien scheinen die verwandtesten Formen zu sein.

4. Ordnung: **Myxosporidia.**

Die überwiegende Mehrzahl der Myxosporidien besteht aus großen, zumeist schon makroskopisch sichtbaren Plasmakörpern, die in fast allen Organen, teils innerhalb, teils außerhalb der Zellen bei Fischen und einigen Amphibien und Reptilien vorkommen. Sie haben in vielen Fällen ein amöbenartiges Aussehen, besonders jene, die in Körperhöhlen (Harn- oder Gallenblase) schmarotzen. Ihr Vermögen, Pseudopodien der verschiedensten Formen auszusenden, macht sie noch rhizopodenähnlicher (Fig. 33 A bis C). Entweder bewegen sie sich kriechend mit Hilfe dieser Fortsätze in der betreffenden Flüssigkeit, oder sie haften vermittels der Pseudopodien an der Wand der Epithelien dieser Organe fest (Fig. 34a). Andere Vertreter der Myxosporidien bestehen aus unbeweglichen Cysten, die in den Geweben des Wirtes liegen und oft eine beträchtliche Größe erreichen, so daß sie beulenartig aus dem Wirtskörper herausragen. Tritt eine diffuse Infiltration der Gewebe durch den Parasiten ein, so kann von einer bestimmten Körperform überhaupt nicht mehr gesprochen werden. Die Größe der frei in der Harn- oder Gallenblase lebenden Parasiten kann ganz beträchtlich sein. Sphaeromyxa Balbianii erreicht z. B. einen Durchmesser von 4 bis 5 mm. Die gewebsschmarotzenden Arten besitzen häufig Cysten von 1 bis 3 mm Durchmesser. Die Geschwülste, in denen natürlich auch Gewebsteile des Wirtes liegen, erreichen Erbsen- bis Apfelgröße. Ihre Ernährung und ihr Wachstum erfolgt auf endosmotischem Wege auf Kosten der umliegenden Gewebe. Auch die in Körperhöhlen freilebenden Myxosporidien nehmen ihre Nahrung in dieser Weise osmotisch durch Aufsaugen flüssiger Nahrungsstoffe zu sich. Sie verhalten sich in dieser Beziehung wie alle übrigen Sporozoen. Das ist um so bemerkenswerter, da man eigentlich annehmen müßte, daß sie, wie Rhizopoden, mit Hilfe ihrer Pseudopodien recht gut feste Nahrung aufzunehmen vermöchten. Obwohl sie nahe verwandtschaftliche Beziehungen zu den Rhizopoden besitzen, müssen sie schon aus diesem Grunde, ganz abgesehen von ihrer Fortpflanzung vermittels Sporen, von dieser Gruppe getrennt werden. Vielfach dienen die Pseudopodien weniger als Bewegungsorgane, sondern in erster Linie als Haftorgane, mit welchen sich die Schmarotzer an die Epithelwände der von ihnen bewohnten Organe befestigen (Fig. 34). Der Körper der sogenannten freien Myxosporidien läßt deutlich Ektoplasma und Endoplasma erkennen (Fig. 35 Ek und En). Diese Scheidung ist bei den gewebsschmarotzenden Formen nur angedeutet oder fehlt gänzlich, das Ektoplasma scheint nutzlos geworden zu sein, da keine amöboiden Bewegungen ausgeführt werden und kein äußerer Schutz notwendig ist. Das Endoplasma schließt zumeist zahlreiche Kerne ein und ist außerdem gröber granuliert als das fast homogene Ektoplasma. Durch das Auftreten von Pansporoblasten, Sporoblasten und Sporen, sowie Granulationen verschiedener Art kann sein Aussehen sehr kompliziert werden.



Fig. 34a. Myxidium Lieberkühni. Mehrere Exemplare an dem Epithel der Harnblase vom Hecht (Esox lucius). Etwas schematisch. Nach Olaw Schröder.

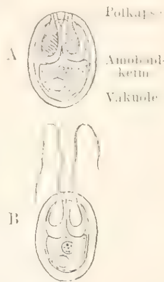


Fig. 34b. Schema einer Cnidosporidienspore mit zwei Polkapseln und einem Keimling (Amöboidkeim). In Fig. B sind die Polfäden ausgeschnellt.

Die Sporen liegen entweder frei im Endoplasma (Fig. 33 A bis C) oder wie bei den gewebsschmarotzenden Arten im Zentrum der Cysten. Ihre Zahl schwankt bei den verschiedenen Arten außerordentlich. Man vermag jedoch zwei große Gruppen nach der Anzahl der Sporen aufzustellen. Die Disporea (Doflein) bilden stets nur zwei Sporen aus (Fig. 33 A bis B), während die Polysporea, die die bei weitem größte

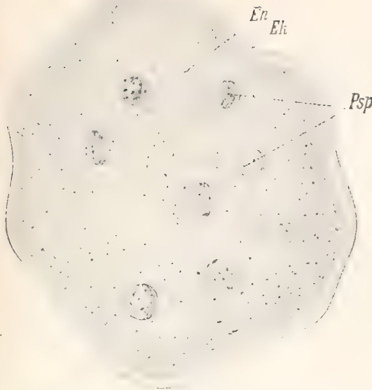


Fig. 35a. Myxidium Sabrazesi. Vielkerniges Myxosporidium mit zahlreichen Sporen im Plasma. Ek Ektoplasma. En Endoplasma. Psp Pansporoblasten. Nach Doflein.

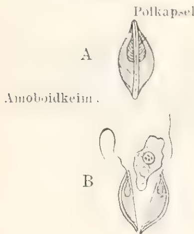


Fig. 35b. Cnidosporidienspore mit zwei Polkapseln. A von der Seite, B Spore geöffnet mit austretendem Amöboidkeim. Schema.

Anzahl von Formen enthält, ungeheure Massen von Sporen bilden.

Die Sporen selbst bestehen aus einer zweiklappigen Schale, die einen bilateral-symmetrischen Bau insofern besitzt, daß man eine rechte und linke Schalenhälfte unterscheidet (Fig. 35 A und B). Das Vorderende enthält 2 bis 4 Nesselkapseln, die bei den Myxosporidien „Polkapseln" genannt werden. Der wichtigste Bestandteil der Spore ist der Amöboidkeim, aus dem die zukünftige Cnidosporidie entsteht (Fig. 34 A und B) und der dem Sporozoiten der Coccidien entspricht. Nach dem Platzen der Sporenschalen unter der Einwirkung des Darmsaftes des neuen Wirtes tritt der Keim aus (Fig. 35 B). Er vermag wie eine Amöbe Pseudopodien auszustrecken und ist sehr beweglich. Dieser Keim dringt in eine Zelle (Darmepithelzelle) ein und wächst in ihr heran. Nach Aufzehrung derselben kann er eventuell frei in den Geweben des Wirtes leben. Er kann auch in die Blutbahn gelangen und in alle Gewebe und Organe des Wirtes verschleppt werden. Mit Vorliebe werden Kiemen, Leber, Niere und Muskeln befallen; jedoch sind für einige Gattungen Gallen- und Harnblase bevorzugte Aufenthaltsorte.

Dort vermehrt sich der Parasit zumeist auf ungeschlechtlichem Wege durch Teilung oder Knospung (multiplikative Fortpflanzung). Nach Auerbach soll sich hier bei Schmarotzern der Gallenblase ein Konjugationsvorgang einschieben. Es legen sich zwei der durch Teilung entstandenen Stadien aneinander. Das eine bleibt unverändert, das andere teilt sich unter dem Zeichen einer Karyokinese. Die eine Hälfte des geteilten Keimes löst sich ab und geht zugrunde, die andere verschmilzt mit dem unveränderten Keim, ohne daß aber die Kerne sich vereinigen. Die auf diese Weise entstandene Form enthält dann einen großen und einen kleinen Kern. Durch Vermehrung der Kerne und Wachstumsprozesse kommt es zur Entwickelung der vielkernigen vegetativen Formen. Frühzeitig kommt es jedoch zur Bildung eines vielkernigen Stadiums, das die Sporenbildung einleitet. Oft sind diese Kerne in größerer Anzahl vorhanden und lassen eine Größendifferenz erkennen, so daß es wahrscheinlich ist, daß in den Tieren somatische und Geschlechtskerne vorhanden sind. Letztere würden zur Sporenbildung Verwendung finden, während die somatischen als Restkerne degenerieren. Weitere Untersuchungen müssen nach dieser Richtung hin abgewartet werden. Wie geht nun die Bildung der Sporen vor sich? Um einen der Kerne bildet sich eine protoplasmatische Grenzzone aus, die durch größere Dichtigkeit von der Umgebung absticht. Weitere Kerne können folgen. Dieser abgesprengte, kernhaltige Teil, der sich merkwürdigerweise im Tier bildet, ohne daß sich dasselbe vorher einkapselt oder aufhört, sich zu bewegen, nennt man den Pansporoblasten (Fig. 36) nach Keysselitz, dessen neuere Unternehmungen an Myxobolus Pfeifferi sehr eingehender Natur sind, ist dieser Prozeß jedoch nicht so einfach.

Er nennt diese abgegrenzten, kernhaltigen Plasmakugeln noch nicht Pansporoblasten, sondern Propagationszellen. Sie vermehren sich durch mitotische Teilung und bilden kleine Zellhaufen (Fig. 36, A 2). Nach Abschnürung je einer kleinen Zelle (Fig. 36 B) vereinigen sich je zwei derartiger Propagationszellen. Die beiden kleinen Zellen bilden eine Hülle (Fig. 36 C). Keysselitz nennt erst dieses Stadium den Pansporoblasten. Die weitere Entwickelung geht nur noch an den Gametoblasten vor sich, während die Hüllzellen mit ihren Restkernen keinen weiteren Anteil an der Sporenbildung haben. Die Gametoblasten teilen sich in zwölf Zellen (Fig. 36 G), so daß schließlich mit den beiden Hüllzellenkernen ein 14kerniges Stadium erreicht wird. Alsdann vereinigen sich vier Zellen paarweise, nachdem sie vorher Chromatin ausgestoßen haben (Reduktionskerne), zur Copula, ohne daß es aber zur Vereinigung der Kerne kommt. Wir haben dann in dem Pansporoblasten 10 Zellen, von denen aber 2 zwei Kerne enthalten. Diese Zellenmasse sondert sich in zwei Haufen, die beiden Sporoblasten, von denen demnach jeder fünf Zellen (davon je eine 2kernig) enthält (Fig. 36 J). Zwei von diesen fünf Zellen flachen sich ab und werden zu den Schalenzellen, indem sie die zweiklappige Schale aus sich hervorgehen lassen (Fig. 36 K). Sie umschließen die drei übrigen. Zwei weitere Zellen werden zu den

Polkapselzellen (Fig. 36K) und lassen in ihrem Innern die Polkapseln entstehen. Schließlich ist von den fünf Zellen die zweikernige noch übrig, die zum Amöboidkeim wird (Fig. 36L). Gelangen die auf diese Weise entstandenen Sporen nach außen, oder in den Darm eines anderen Wirtes, so verschmelzen die beiden Kerne des Amöboidkeimes zum Syncaryon (Fig. 36M). Dieser komplizierte geschlechtliche Prozeß ist eine isogame Autogamie (Pädogamie) im Sinne Hartmanns.

Die Ansichten anderer Autoren stimmen vielfach mit den von Keysselitz gemachten Befunden an Myxobolus Pfeifferi nicht ganz überein. Es scheint jedoch festzustehen, daß die Bildung der Pansporoblasten und der Sporen von geschlechtlichen Prozessen begleitet ist.

Eine große Zahl der Myxosporidien sind harmlose Schmarotzer, hauptsächlich die, die in der Harn- oder Gallenblase ihrer Wirte leben; aber auch die gewebebewohnenden Formen sind oftmals für das Wirtstier nicht gefährlich, wenn sie nicht durch enormes Größenwachstum den Organismus so stark schädigen, daß er infolge Funktionsstörung wichtiger Organe den Tod findet. Es scheint aber auch nicht unwahrscheinlich zu sein, daß gewisse Myxosporidiengifte das Zugrundegehen so mancher von Myxosporidien befallenen Organismen (hauptsächlich Fische) veranlassen.

Einteilung der Myxosporidien.

a) Disporea (Doflein).

Sie umfassen eine kleine Gruppe der bekannten Myxosporidien. Amöboid bewegliche Formen, die stets nur einen Pansporoblasten mit 2 Cnidosporen bilden. Das Individuum geht nach der Sporenreife zugrunde.

Leptotheca agilis aus der Gallenblase von Tyrgon pastinaca und anderen marinen Fischen (Fig. 33A).

Ceratomyxa inaequalis, Gallenblase von Crenilabrus mediterraneus. Beide Formen sind harmlose Schmarotzer.

b) Polysporea (Doflein).

Sie enthalten die drei großen Familien der Myxobolidae, Chloromyxidae und Myxidiidae, die nach der Zahl ihrer Polkapseln auseinander gehalten werden. Die Myxobolidae haben außerdem eine jodophile Vakuole.

In den erwachsenen Polysporidien entstehen zahlreiche Pansporoblasten, die allmählich entstehen und heranreifen, während sich die Tiere bewegen, Nahrung aufnehmen und wachsen. Unter ihnen sind sowohl Bewohner von Körperhöhlen wie Gewebsschmarotzer. Sie kommen in Fischen, Reptilien, Amphibien und auch in Arthropoden vor. Einige Arten verursachen verheerende Fischkrankheiten.

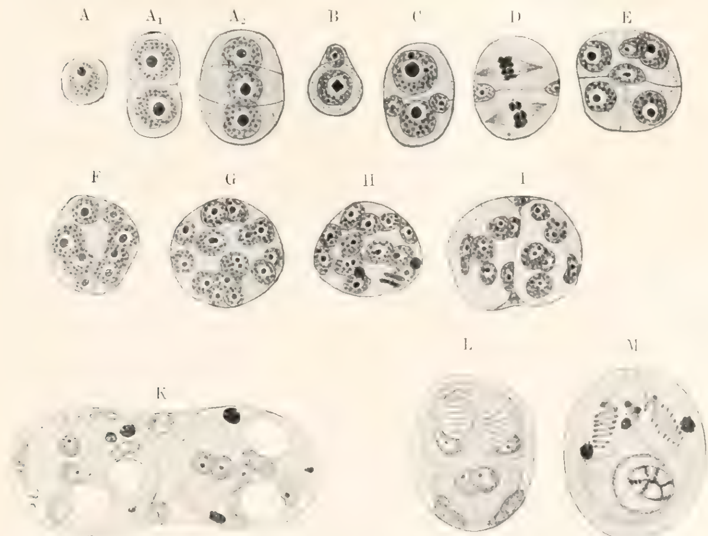


Fig. 36 A bis M. Myxobolus Pfeifferi. Bildung und Entwickelung der Pansporoblasten und Sporen. A bis A_2 junger Pansporoblast und dessen Vermehrung. B bis I die Entwickelung eines Pansporoblasten. B Zweizellenstadium. C Vierzellenstadium. D Uebergang zu E Sechszellenstadium. F achtkerniges. G vierzehnkerniges Stadium. H zwölfkerniges Stadium infolge von Degeneration des 13. und 14. Kernes. I Bildung der beiden Sporoblasten. K Pansporoblast mit Restkernen, Schalenbildungskernen, Polkapselkernen und Kernen der Amöboidkeime. L zweikernige Spore. C reife, einkernige Spore. Nach Keysselitz. Aus Doflein.

Die beiden Familien der Myxidiidae und Chloromyxidae sind klein und enthalten harmlose Parasiten (auch die Gewebsschmarotzer sind ungefährlich).

Myxidium Lieberkühni (Fig. 34a), Harnblase des Hechtes. Sphaerospora divergens (Fig. 33C) Nierenkanälchen von Blennius pholis. Chloromyxum Leydigi, Gallenblase von Selachiern. Die Familie der Myxobolidae ist sehr artenreich und enthält fast nur Gewebeparasiten, darunter einige sehr schädliche. Cysten mitunter hühnereigroß.

Myxobolus Pfeifferi (Thélohan) im allgemeinen harmloser Schmarotzer der Barben und anderer Fische. Die durch diesen Parasiten verursachte Beulenkrankheit oder Barbenseuche hat wohl nur Bedeutung für Frankreich und Westdeutschland (z. B. Flußgebiet der Maas, Mosel, Rhein, Seine, Marne usw.). Sie vernichtet oftmals den ganzen Barbenbestand einzelner Flußläufe. Befällt hauptsächlich die Muskulatur und erzeugt große Tumoren, die beulenartig über die Oberfläche des Körpers hervorragen (Fig. 37A und B).

Myxobolus neurobius (Schuberg und Schröder), Parasit des Nervensystems der Forellen und Aeschen. Stark pathogen.

Myxobolus cyprini (Doflein und Hofer) wurde bislang als Erreger der so gefürchteten Pockenkrankheit der Karpfen angesehen. In der Niere der Fische. Neuere Autoren stellten fest, daß auch Pockenkrankheit ohne Parasiten auftritt.

Lentospora cerebralis (Hofer). Erreger der in Züchtereien auftretenden Drehkrankheit der Salmoniden. Sitz des Parasiten in den knorpeligen Teilen des Kopfes, Schwanzes und der Flossen. Granulosebildungen, Deformationen des Kopfes. Ist das Gehörorgan infiziert, so führen die Fische taumelnde Bewegungen aus, die oft ihren Tod veranlassen können.

5. Ordnung: **Mikrosporidia.**

Cnidosporidien mit sehr kleinen, meist ovalen Sporen. Zwei Schalen sind vielfach nachzuweisen. Jede Spore enthält nur eine Polkapsel, die erst durch Zusatz von Reagentien sichtbar wird. Fast alle Mikrosporidien sind Zellschmarotzer. Sowohl Fische wie Arthropoden kommen als hauptsächliche Wirte in Frage. Sie sind aber auch bei Amphibien, Würmern, Bryozoen und in neuerer Zeit bei Protozoen (Gregarinen) gefunden worden. Besonders bei Arthropoden können sie verheerende Seuchen verursachen (Pébrine der Seidenraupen und Ruhr der Bienen). Die meisten Vertreter sind jedoch harmlos für ihren Wirt.

Die Mikrosporidien sind ein- oder mehrkernige Gebilde von zumeist sehr geringer Größe, so daß

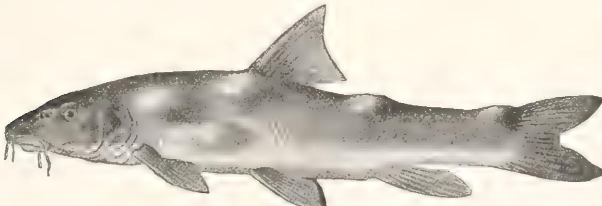


Fig. 37 a. Barbe mit Myxosporidienbeulen. Nach Doflein.



Fig. 37 b. Schnitt durch den Körper einer beulenkranken Barbe, um die Verdrängung der Muskelsubstanz durch die riesigen Parasitencysten zu zeigen. Nach Keysselitz. Aus Doflein.



Fig. 38. Glugea anomala Mongiez. Schema einer reifen Spore. Vergrößerung 5000. Nach Stempell.

sie in einer Wirtszelle in großen Mengen Platz finden können (Fig. 39 und 41). Eine deutliche Differenzierung von Ekto- und Endoplasma wie bei den Myxosporidien ist nicht nachweisbar, ebenfalls fehlt Pseudopodienbildung (eine Ausnahme bildet Mariona marionis Thél).

An den kleinen Sporen ist die zweiklappige Schale nur schwer nachzuweisen. Die am Vorderende liegende Polkapsel entspricht in ihrem Bau der der Myxosporidien. Freilich ist ihre Kapselwand so zart, daß sie nicht leicht aufzufinden ist (siehe Schuberg 1910). In der mittleren Sporenregion liegt zumeist der Keim der Spore. Er enthält mehrere Kerne (Fig. 38), deren Zahl zwischen 1 bis 4 schwankend angegeben wird. Infolge ihrer Kleinheit sind die Sporen der Mikrosporidien betreffs ihres feineren Baues bedeutend weniger gut bekannt, als die der Myxosporidien.

Die Entwickelungsgeschichte dieser Gruppe ist ebenfalls noch sehr wenig untersucht mit Ausnahme einiger Formen, von denen z. B. Nosema bombycis (Naegeli) zu nennen ist, die eine eingehende Untersuchung durch Stempell (1909) erfahren hat (Fig. 39). Dieser Erreger der Pébrine-Krankheit besitzt sowohl eine ungeschlechtliche Vermehrung, bei welcher eine vielfache und rapide Teilung eintritt, die alle Organe der Seidenraupe mit Keimen überschwemmt, als auch eine Sporogonie. Der Parasit bildet zuerst größere lappige Massen, in denen zahlreiche kugelige Pansporoblasten mit vielen Sporen entstehen.

Werden Seidenraupen durch Aufnahme von Sporen infiziert, so schnellt der Polfaden aus, sobald der Darmsaft auf die Spore zu wirken beginnt und der anfangs zweikernige Keim verläßt die Sporenhülle. Beide Kerne verschmelzen (Syncaryon) und die Keime beginnen sich durch Zweiteilung und Knospung zu vermehren, so daß sie in kleinen Kolonien im Darmlumen zerstreut liegen.

Diese „Planonten", wie sie Stempell nennt, verlassen den Darm und, indem sie sich zwischen

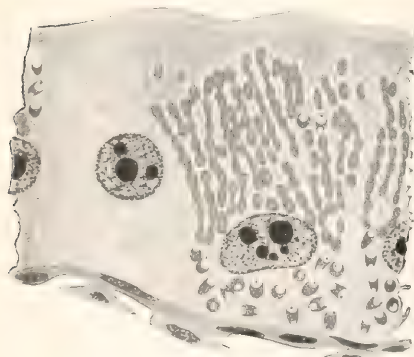


Fig. 39[1]



Fig. 39[2] Fig. 39[4]



Fig. 39[3]

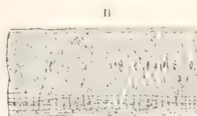


Fig. 39[6]

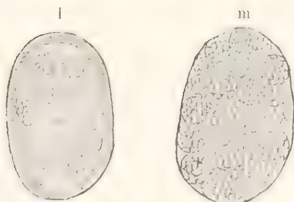


Fig. 39[5]

Fig. 39 1—6. Nosema bombycis Naeg. Entwickelungszyklus. Fig. 39[1] Darmepithel mit Sporen und den eigenartigen, pilzähnlichen agamen Fortpflanzungsketten. Nach Stempell. Fig. 39[2] a bis d Sporen, a und b frisch, in b die Vakuole sichtbar, c und d mit Salpetersäure behandelt, Polkapsel und Polfaden sichtbar. Fig. 39[3] e und f Wachstumsstadien, g bis i Sporulation. Fig. 39 4—6 infizierte Gewebe der Wirte. k Hodenfollikel der Seidenspinnerraupe. l und m verschieden stark infizierte Magenepithelzellen von Saturnia Pernyi. n Schnitt durch die Magenwand einer jungen Seidenspinnerraupe. a bis d nach Thélohan, e bis n nach Balbiani. Aus Doflein.

den Epithelien desselben hindurchdrängen, gelangen sie in die Leibeshöhle und in den Blutstrom des Wirts und werden in alle Körpergegenden verschleppt. Sie dringen in eine Zelle ein und diese intrazellulären Stadien heißen jetzt „Meronten oder Schizonten". In der Zelle setzt eine lebhafte Teilung ein, die so schnell aufeinander folgen kann, daß es zu rosenkranzförmigen, zusammenhängenden Ketten von Parasiten kommt (Fig. 39[1]). Bei Eintritt ungünstiger Lebensbedingungen innerhalb der Zelle schreiten die Parasiten zur Sporogonie, so daß aus den Schizonten „Sporonten" werden. Der Schmarotzer scheidet eine zarte Membran aus (Encystierung), in seinem Plasma tritt eine große Vakuole auf und schließlich teilt sich der eine Kern in vier. Höchstwahrscheinlich wird einer zum Amöboidkeimkern, einer zum Kern der Polkapselzelle und zwei zu den Kernen der Schalenzellen. Es entstehen Sporenschalen und Polkapseln. Der Kern des Amöboidkeimes teilt sich. Die reifen Sporen müssen ins Freie und in den Darm einer anderen Raupe gelangen. Der zweikernige Amöboidkeim macht nochmals eine Kernteilung durch. Bevor der Keim aus seiner Sporenhülle auskriecht, stößt er zwei von den vier Kernen aus. Die beiden zurückbleibenden Kerne verschmelzen und die einkernigen „Planonten" beginnen ihren neuen Entwickelungszyklus (Fig. 39[2–6]). Sobald die Sporen in den Darm einer anderen Raupe gelangen, schnellen die Polfäden aus ihren Behältern aus. Die Kernteilungen während dieser Prozesse können verschieden verlaufen. Bei manchen Formen wurde für die Schizogonie direkte Kernteilung angegeben (Stempel, Hesse, Schröder), von anderen (Pérez usw.) typische Mitose.

Auch geschlechtliche Vorgänge, die mit großer Wahrscheinlichkeit bei den Mikrosporidien vorhanden sein werden, sind verschiedentlich beschrieben worden. Nach Merciers Untersuchungen an Thélohania giardi (1909) werden am Ende der Schizogonie Isogameten gebildet, die paarweise verschmelzen. Auf diese Weise kommt der Sporont zustande, der sich in acht Sporoblasten teilt, die in einer zarten Cyste liegen sollen. Die in diesem „Pansporoblasten" liegenden Sporoblasten sind einkernig. Es entstehen durch Teilungen fünf Kerne, nämlich ein Polkapselzellkern, zwei Schalenzellkerne und zwei Amöboidkeimkerne. Schale und Polkapsel bilden sich in der bekannten Weise.

Bei manchen Mikrosporidien ist bislang weder eine Polkapsel noch ein Polfaden nachgewiesen worden. In gewissen Fällen können die Parasiten in den Geweben des Wirtes zu gewaltigen, mit Sporen erfüllten Gebilden heranwachsen, die vom Wirt mit einer bindegewebigen Kapsel umgeben werden (Fig. 40. Querschnitt durch einen Stichling mit zwei Cysten).

Die Einteilung der Mikrosporidien erfolgt nach der Art ihrer Sporenbildung. Werden auf endogenem Wege zahlreiche Pansporoblasten mit zahlreichen Sporen gebildet, so spricht man von Vertretern der Polysporogenea (Doflein), zu denen als wichtigste Abteilung die Gattung Glugea (Thél.) zu rechnen ist. Der Körper des Parasiten kann während der Bildung der Sporen weiter wachsen und neue Keime erzeugen. Wird der ganze Körper des Schmarotzers bei der

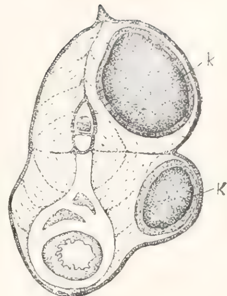


Fig. 40. Querschnitt durch einen Stichling mit zwei Cysten von Nosema anomalum in der Muskulatur (k). Nach Thélohan. Aus Doflein.

Sporenbildung aufgebraucht, so hat man es entweder mit Vertretern der Oligosporogenea (Doflein) zu tun, wenn in dem einen Pansporoblasten, in den sich der Parasit umwandelt, sich eine bestimmte Anzahl von Sporen bildet (Gattungen: Plistophora, Thélohania, Gurleya) oder es sind Vertreter der Monosporogenea (Pérez), bei denen sich der ganze Körper ohne Pansporoblastenbildung in eine einzige Spore umwandelt. Zu ihnen gehört die Gattung Nosema (Naegeli) mit ihren interessanten Vertretern Nosema bombycis, dem Erreger der Seidenraupenkrankheit und Nosema apis (Zander), die die sogenannte „Ruhr" der Bienen hervorruft (Fig. 41). Nosema bombycis (Naegeli) findet sich fast in allen Geweben der Raupen und Schmetterlinge. Besonders bemerkenswert ist auch das Vorkommen des Parasiten bereits in den Eiern des Seidenspinners, so daß die Krankheit direkt auf die Embryonen und in die jungen Raupen übertragen wird. Pasteur gab eine Methode an, die infizierten Eier mikroskopisch zu erkennen, so daß es möglich ist, sie rechtzeitig von den gesunden zu sondern. Außerdem werden die erkrankten Raupen ausgelesen und vernichtet. Man ist mit Hilfe dieser Methoden

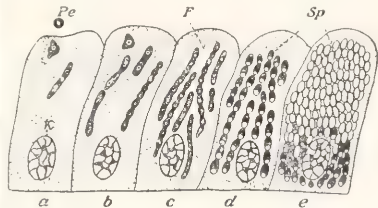


Fig. 41. Nosema apis Zander. Schematische Darstellung des Entwickelungsganges in der Darmwand der Honigbiene. a bis e Darmzellen mit aufeinanderfolgenden Entwickelungsstadien des Parasiten. K Kerne. Pe junger Keim dringt in die Zelle, wird mehrkernig, zerfällt in weitere Keime, die zu Schläuchen auswachsen, die wiederum in Sporen (Sp) zerfallen. Bei F Verflüssigung der Zellsubstanz. Nach Zander. Aus Doflein.

der Pébrine oder Gattina, wie diese Seidenraupenkrankheit auch genannt wird, teilweise Herr geworden, so daß sie nicht mehr den ungeheuren Schaden wie in früheren Zeiten anzurichten vermag.

6. Ordnung: **Actinomyxidia** (Stolc).

Sie sind bekannt aus dem Darmepithel von Süßwasser- und Meerestubificiden. Ihre Sporen sind zumeist durch lange, stern- oder ankerförmige Fortsätze ausgezeichnet (Fig. 42). Da derartige Sporen freischwebend im Plankton gefunden wurden, so nimmt man an, daß sie zur Verbreitung der Art durch Erhöhung der Schwebfähigkeit dienen. Sie sind dreistrahlig radiär gebaut und besitzen eine dreiklappige Schale. In einem Pansporoblasten entstehen 8 Sporen, von denen jede drei Polkapseln (Fig. 42IIa) und zumeist acht oder mehr Amöboidkeime darstellen. Der erwachsene Parasit liegt in einer gemeinsamen zweizelligen Hülle, die im Innern acht Sporen zur Ausbildung bringt, wobei der ganze Körper, den man mit einem Pansporoblasten vergleichen könnte, aufgeteilt wird. Sexuelle Vorgänge sind bei der Fortpflanzung nachgewiesen.

7. Ordnung: **Sarcosporidia (Rayney-Mieschersche Schläuche).**

Die Sarkosporidien sind Schmarotzer der Muskelfasern und besitzen eine zumeist schlauchförmige Gestalt. Sie zerfallen in zahlreiche nieren- oder sichelförmige Sporozoite. Im Innern von quergestreiften Muskelfasern, besonders bei Säugetieren und unter ihnen vorzugsweise bei Pflanzenfressern, sind sie häufige Parasiten. Außerdem kommen sie, wenn auch seltener, bei Reptilien und Vögeln vor. Ihre systematische Stellung ist ungewiß, weil ihre Entwickelungsgeschichte nicht genügend bekannt ist. Außerdem sind wir, trotz zahlreicher Untersuchungen, über den Aufbau und die Struktur der ausgewachsenen Formen und der sichelförmigen Körperchen, die hier als Sporen bezeichnet werden, aber tatsächlich wohl mit den Sporozoiten der übrigen Sporozoen verglichen werden müssen, nicht genügend unterrichtet. Die Art der Uebertragung ist unbekannt; man nimmt mit großer Wahrscheinlichkeit an, daß sie per os geschieht, da es mehrfach gelang, durch Verfüttern bei den Versuchstieren Sarkosporidieninfektion hervorzurufen. Man nimmt ferner an, daß die Parasiten verwandtschaftlich den Mikrospodien am nächsten stehen.

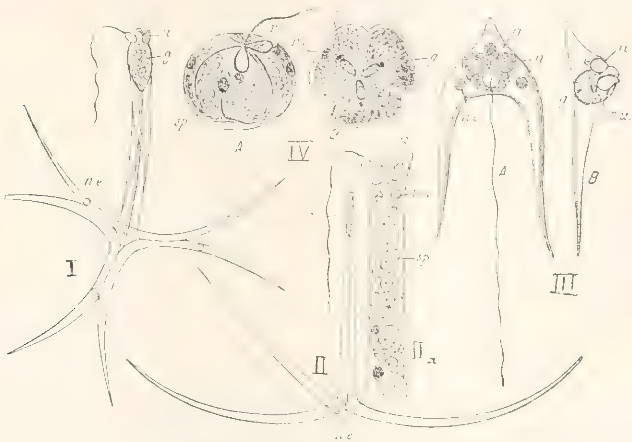


Fig. 42 I bis IV. Sporen verschiedener Actinomyxideen. I Hexactinomyxon psammoryctis. II Triactinomyxon ignotum. IIa Keimmasse in dieser Spore, die Amöboidkeime und die Polkapseln zeigend. III Synactinomyxon tubificis. A Ansicht vom Polkapselfeld. B Profilansicht. IV Sphaeractinomyxon Stolci. A Seitenansicht. B Ansicht vom Polkapselfeld. g Keimmasse. sp Amöboidkeime. ne Schalenkern. nu Polkapselkern. u Polkapsel, einige davon mit ausgeschleudertem Spiralfaden. I, II, III nach Stolc, IIa nach Léger, IV nach Caullery und Mesnil. Aus Doflein.

Das Sarkosporid besitzt einen länglichen Körper, der selbst auf den jüngsten Stadien, die bis jetzt beobachtet sind, bewegungslos ist. Anfangs ist der Parasit nur von einer zarten Cuticula umgeben (Fig. 43). Allmählich bildet sich noch eine zweite äußere Schicht aus, die bedeutend dicker ist als die innere und eine radiäre Streifung zeigt, die wie ein Borstenbesatz aussieht und die die verschiedensten Deutungen sowohl hinsichtlich ihrer Struktur wie ihrer Entstehung erfahren hat (Fig. 44A und B). Teils führt man die Streifung auf Porenkanäle zurück, die die direkte Hülle durchsetzen und vergleicht sie mit ähnlichen radiären Strukturen

bei Cnidosporidien, und auf Grund der dort gemachten Feststellungen hält man beide Schichten für Differenzierungen des Ektoplasmas des Parasiten; teils halten die Autoren die Streifenhülle überhaupt für kein Produkt des Sarkosporids, sondern des Wirtes und zwar für dessen umgewandelte Muskulatur. Sie ist zumeist so dick, daß sich die Schläuche mit Leichtigkeit aus den umgebenden Geweben herauspräparieren lassen. Der Schlauch selbst enthält auf jungen Stadien nur wenige Zellen mit deutlichen Kernen (Fig. 43); er liegt ausnahmslos intrazellulär und zumeist innerhalb von Muskelzellen (mit wenigen Ausnahmen). Die noch jüngeren Stadien, die noch keine Cuticula ausgebildet haben, sollen nach Angaben von Erdmann amöbenartige, zweikernige Gebilde sein, die wachsen und vielkernig werden. Der Schlauch wächst durch die zahlreichen Zellteilungen zur beträchtlichen Größe heran, zumeist in der Längsrichtung der Muskelfasern.

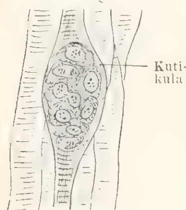


Fig. 43. Junger Sarkosporidienschlauch.

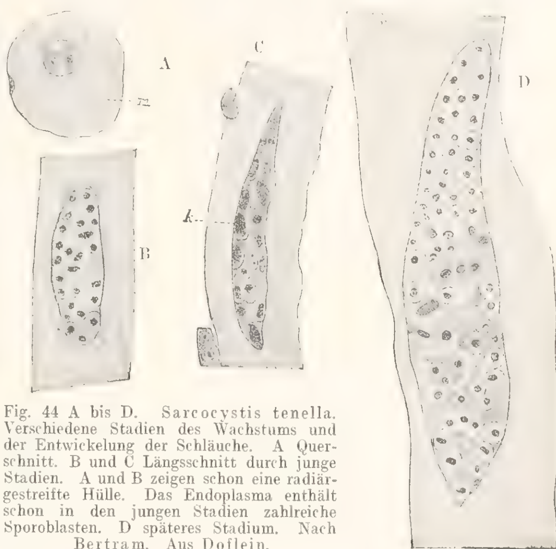


Fig. 44 A bis D. Sarcocystis tenella. Verschiedene Stadien des Wachstums und der Entwickelung der Schläuche. A Querschnitt. B und C Längsschnitt durch junge Stadien. A und B zeigen schon eine radiärgestreifte Hülle. Das Endoplasma enthält schon in den jungen Stadien zahlreiche Sporoblasten. D späteres Stadium. Nach Bertram. Aus Doflein.

Während in den jüngsten und jungen Schläuchen nur Zellen einer Art vorhanden sind (Fig. 43), enthalten die älteren durchweg zwei Gruppen von Zellen, runde Formen und sichelförmige Körperchen (d. h. Sporen). In den jüngeren Schläuchen treten die Zellgrenzen bisweilen nicht so scharf hervor wie in den älteren Cysten, so daß der Inhalt des Schlauches den Eindruck eines Syncytiums macht. Die in der Entwickelung weiter fortgeschrittenen Stadien zeigen die Anfangsstadien der Zellenbildung nur noch an den beiden Polen des Schlauches und eventuell an den seitlichen Wänden, während die Mitte von den sichelförmigen Körperchen, die in Ballen zusammenliegen, eingenommen wird (Fig. 45). Außerdem tritt jetzt im Schlauche eine Kammerung auf, indem zarte Septen von der inneren Membran auswachsen (Fig. 45). Die älteren Sarkosporidienschläuche weisen im Zentrum Kammern auf, in denen keine sichelförmigen Körper, sondern nur zerfallende und degenerierte Plasmamassen enthalten sind. Häufig reißen auch in diesem Teile des Schlauches die Kammerwände ein, so daß die Mitte von einem Hohlraum eingenommen wird. Kammern, die in der Nähe der Peripherie des Schlauches liegen, sind klein und enthalten Zellen mit hellem Plasma und großem Kern. Die mehr nach der Mitte zu liegenden Zellen sind ein- oder zweikernig;

Fig. 45. Sarcocystis Blanchardi aus dem Oesophagus des Rindes. Längsschnitt durch eine Cyste. a Muskelfaser. b Cystenhülle. c Muskelkern. d Sporen. e Plasmareste zwischen den „Pansporablasten“. Nach van Eecke. Aus Doflein.



andere Kammern bestehen aus einer protoplasmatischen Grundsubstanz, in der viele Kerne liegen. Schließlich kommen Räume, die völlig mit sichelförmigen Körperchen erfüllt sind

(Fig. 45). Neuerdings wurden auch Längsteilungen dieser Sichelkeime beschrieben (Teichmann usw.). Sie zeigen an dem einen Pol eine feine Querstreifung, die von manchen Autoren als aufgerollter Polfaden gedeutet wird (Fig. 46). Das Vorkommen einer Polkapsel in den Sichelkeimen wurde von verschiedenen Seiten (Laveran und Mesnil, Wasielewski, van Eecke, Erdmann und Rátz) behauptet, ist aber noch nicht völlig einwandfrei sichergestellt. Möglicherweise ist der Fadenapparat in Degeneration begriffen, woraus sich die vielen widersprechenden Angaben erklären ließen. Von manchen Autoren werden fadenförmige Fortsätze mitunter an beiden Enden, ferner eine Beweglichkeit der Sichelkeime angegeben. Unserer Kenntnis nach müßten die letzteren eigentlich nicht Sporen, sondern Sporozoite genannt werden in Uebereinstimmung mit den gleichen oder ähnlichen Gebilden der übrigen Sporozoen. Dieser histologische Aufbau des Sarkosporidienschlauches ist von den Autoren verschieden gedeutet worden. Bertram sieht in den jüngsten Stadien die Sporoblastenmutterzellen, die Doflein und andere als Pansporoblasten bezeichnen.



Fig. 46. Sichelkörperchen eines Sarkosporids.

Aus ihnen sollen durch Kernteilungen und darauf folgenden Zerfall des Plasmas die Sporoblasten, d. h. Zellen mit homogenem Plasma und großem Kern entstehen. Diese lagern sich zu Ballen zusammen, die durch das Gerüstwerk in Kammern zusammengehalten werden und die aus sich die sichelförmigen Körperchen (Sporozoiten) hervorgehen lassen. An den beiden Polen der wachsenden Schläuche findet eine fortwährende Vermehrung der Sporoblastenmutterzellen oder der Pansporoblasten statt. In den großen ausgewachsenen Sarkosporidien zerfallen die Sichelkeime im Zentrum des Schlauches. Durch die schon erwähnten Längsteilungen der Sichelkeime wird ein weiteres Wachstum des Schlauches bewrkt (Negri, L. v. Betegh, Teichmann).

Wie aus diesen kurzen Angaben zu ersehen ist, ist die Morphologie der Parasiten und ihrer Sporen nicht genügend geklärt. Noch bei weitem weniger ist jedoch der allgemeine Gang der Entwickelung, die multiplikative Fortpflanzung (Schizogonie) und die geschlechtlichen Vorgänge bekannt. Ebenfalls ist der Vorgang der Infektion in ein völliges Dunkel gehüllt. Man nimmt zwar an, daß die Infektion auf direktem Wege ohne Zwischenwirt per os stattfindet, da es nicht nur gelang, Mäusearkosporidien direkt durch Verfütterung der Cysten auf andere Mäuse zu übertragen, sondern Negri übertrug das Mäusesarkosporid auch auf Meerschweinchen und Erdmann das Hammelsarkosporid auf Mäuse. Sicheres über die natürliche Infektion liegt jedoch bisher nicht vor. Das Vorhandensein eines Zwischenwirtes wird ebenfalls von einigen Autoren für möglich gehalten (Kasparek). Die Infektion scheint bereits bei jungen Tieren auf der Weide vor sich zu gehen. Die Parasiten sind sehr häufig. So hat Bertram von 185 Schafen 182 sakrosporidienkrank gefunden. Braun fand, daß man an manchen Orten über 100% infizierte Tiere feststellen kann. Wie sich der Parasit auf dem Wege vom Darm zur Muskulatur verhält, ist nur in ganz groben Zügen bekannt. Erdmann hat in neuerer Zeit diese Vorgänge genauer studiert und kommt zu folgenden Schlüssen. Sobald der sichelförmige Keim in den Magen eines neuen Wirtes gelangt, quillt er stark auf und es tritt ein „Polfaden“ aus. Am 10. Tage nach der Fütterung wurden im Lumen des Darmes und seiner Anhänge „runde Körper mit Protoplasmasaum“ und „kleine amöboide Formen“ gefunden. Im Lymphspaltensystem der Darmmuskulatur wurden dann mehrkernige Stadien festgestellt. Durch die Lymphwege gelangen dann die jungen Keime in die Fettgewebe und in die Lymphspalten der Körpermuskulatur. In der fünften Woche nach der Infektion treten in der Muskulatur kleine runde Cysten auf, in denen eine protoplasmatische Masse festzustellen ist. Auch ein einzelliges Stadium mit zwei Kernen wurde von Erdmann beobachtet.

Nach allen angestellten Versuchen erscheint es wahrscheinlich, daß die Infektion durch den Mund und Verdauungskanal erfolgt, wie es bei den meisten Sporozoen der Fall ist. So erklärt sich auch höchst einfach die dichte Nähe der Sarkosporidiencysten zu dem Oesophagus. Trotzdem bleibt der Weg der Infektion schwer verständlich wenn wir bedenken, daß die meisten Wirte Pflanzenfresser sind. Der Mensch wird ebenfalls, wenn auch nicht häufig, von Sarkosporidien befallen. Auf sein weiteres Wohlbefinden scheint die Infektion keinen Einfluß zu haben.

Viele Beobachtungen machen es äußerst wahrscheinlich, daß die pathogene Bedeutung der Sarkosporidien nicht nur in bloßer Zerstörung der Gewebe des Wirtes besteht, sondern daß sie auch ein aktives Gift, ein Toxin, auszuscheiden vermögen. Die beiden französischen Forscher Laveran und Mesnil haben zuerst dieses Gift aus Schafssarkosporidien isoliert und es Sarkocystin genannt. Diese Substanz wurde bei experimentellen Versuchen an Kaninchen als äußerst giftig erkannt. ½ Milligramm der frischen Substanz tötete 1 Kilogramm Kaninchen mit Symptomen ähnlich der Cholera. In schwächerer Dosis führt es Cachexie herbei, die gewöhnlich tödlich endete. Eingehender hat neuerdings Teichmann das Sarkosporidiengift untersucht. Er nennt es Sarkosporidiotoxin. Das Gift wird im Zentralnervensystem lokalisiert und an dessen Lipoide gebunden. Teichmann stellte fest, daß Ratten und Meerschweinchen sehr widerstandsfähig gegen die Einwirkungen des Giftes sind. Dagegen ist das Kaninchen äußerst empfindlich. Ferner haben Teichmann und H. Braun nachgewiesen, daß das Gift im Kaninchenorganismus Antitoxin erzeugt und als ein echtes Toxin sensu strictissimo zu betrachten ist. Es ist das bisher einzige Protozoentoxin.

Einteilung der Sarkosporidien.

Innerhalb der Muskelfaser wächst der Parasit heran, wie wir bereits geschildert haben, bis er sie zu ihrer fünf- bis zehnfachen normalen Breite ausgedehnt hat, indem er die kontraktile Substanz der Faser verbraucht. Schließlich geht der Parasit bei weiterem Wachstum in das umgebende Bindegewebe über, jedoch immer noch von einer Hülle aus Muskelsubstanz umgeben, deren Kerne

allmählich verschwinden. So wird der Schmarotzer in zwei verschiedenen Phasen gefunden, denen verschiedene Namen gegeben worden sind, da man annahm, daß sie getrennte Gattungen seien. Die die Muskulatur bewohnende Form wurde als Gattung Miescheriana, das ins Bindegewebe verlagerte ältere Stadium als Balbiania bezeichnet. Seit man weiß, daß beide nur Stadien eines Lebenszyklus darstellen; sind alle Sarkosporidien in die eine Gattung Sarkocystis vereinigt.

Gattung: Sarcocystis (Lankester).

Sarcocystis Miescheriana, in den Muskeln des Schweines (Sus domesticus). In einzelnen Gegenden sehr häufig (bis 98,5 Prozent aller untersuchten Schweine). Vorwiegend in den Kehlkopf-, Zwerchfell- und Zwischenrippenmuskeln. Bei hochgradiger Infektion soll Lähmung der hinteren Extremitäten eintreten können.

Sarcocystis Bertrami (Dofl). Schlundmuskulatur des Pferdes (ungefähr 50 Prozent). Nach einigen Autoren soll der Parasit bei Fohlen die sogenannte Eisballenkrankheit erregen.

Sarcocystis tenella (Raill.), Schlund- und Kehlkopfmuskulatur des Schafes. Sehr häufig. In Rostock nach Bertram bei 182 von 185 untersuchten Schafen. Die größten Schläuche sind bis 20 mm lang, kugelig. Pansporoblasten 4 bis 5 μ.

Hierher die auch beim Menschen gefundenen Formen, die nach den Angaben von Vuillemin zu Sarcocystis tenella gehören. Sarcocystis Lindemanni (Rivolta). Wurde von Baraban in St. Remy bei einem Hingerichteten in der Kehlkopfmuskulatur gefunden. Scheint ebenfalls Sarcocystis tenella gewesen zu sein.

Sarcocystis Blanchardi (Dofl.). Häufig in der Schlundmuskulatur der ungarischen Büffel.

Sarcocystis muris (Blanchard). In der Rumpfmuskulatur von Hausmäusen und Ratten, verursacht mitunter krankhafte Erscheinungen und Todesfälle. Auffällig durch die große Länge der Cysten (mehrere Zentimeter lang). Sporen 13 bis 15 μ lang, 2,5 bis 3 μ dick.

Außerdem kommen Sarkosporidien noch bei zahlreichen anderen Säugetieren, einer Reihe von Vögeln (Huhn, Ente usw.) und mehreren Reptilien vor (Lacerta muralis, Platydactylus mauritanicus = Gecko).

Wie die Infektionsversuche von Negri, Erdmann, Darling usw. beweisen, ändern sich die Arten, sobald sie auf verschiedene Wirte übertragen werden, so daß die Artbestimmung vorläufig wenig gesichert erscheint.

Abstammung und Verwandtschaft.

In neuerer Zeit ist von verschiedenen Seiten der Versuch unternommen worden, die Klasse der Sporozoen aufzuteilen und sie in die beiden selbständigen Klassen der Cnidosporidia und der Telosporidia zu zerlegen (siehe Hartmann, Das System der Protozoen in Prowazek, Handbuch der pathogenen Protozoen, 1. Lief. 1911).

Wir dürfen aber nicht vergessen, daß die Gruppe der Sporozoen durch ihre eigentümliche Fortpflanzungsweise, d. h. durch die Bildung von Sporen, durch ihren ausschließlichen Parasitismus, durch die Aufnahme flüssiger Nahrung auf osmotischem Wege, durch die Rückbildung der Bewegungsorgane und andere charakteristische Merkmale so scharf im ausgebildeten Zustande von den übrigen Protozoen unterschieden ist, daß es uns am zweckmäßigsten erscheinen möchte, sie als selbständige Klasse weiterbestehen zu lassen.

Die Zurückführung der Telosporidien auf flagellatenähnliche Vorfahren und der Cnidosporidien auf rhizopodenartige Stammformen wird mehr oder weniger hypothetisch bleiben, weil die Sporozoen infolge ihres Parasitismus stark abgeänderte Formen bilden, die nicht ohne weiteres mit freilebenden Protozoen verglichen werden können. Mit derselben Berechtigung könnte man sowohl Telo- wie Cnidosporidia gemeinsam von den Rhizopoden ableiten, wenn man außerdem dabei noch berücksichtigt, daß auch die Flagellaten nahe mit den Rhizopoden verwandt sind. Andererseits könnte man Telo-, Cnidosporidien und Rhizopoden von flagellatenähnlichen Vorfahren ableiten. Mindestens würden diese Versuche die gleichen Aussichten und Wahrscheinlichkeiten haben, als die eine Gruppe der Sporozoen von den Rhizopoden, die andere von den Flagellaten direkt abzuleiten. Würde man dann aber die jetzigen Sporozoen entweder mit den Rhizopoden oder Flagellaten vereinigen, so würden ihre charakteristischen Eigenschaften verschwinden, resp. wenig hervortreten, womit der Systematik der Protozoen ein schlechter Dienst geleistet würde. Wir möchten aus diesen Gründen die Klasse der Sporozoen bestehen lassen, ohne uns mit der Frage zu befassen, welche ihrer Ordnungen nähere Verwandtschaften zu den Rhizopoden und welche nähere Beziehungen zu den Flagellaten besitzen. Möglicherweise werden ihre Ahnen in jenen Stammformen gesucht werden müssen, die auch den Rhizopoden und Flagellaten den Ursprung gegeben haben.

In einer weiteren systematischen Frage, die die Stellung der Hämosporidien berührt, möchten wir uns den neueren Ansichten gegenüber vorläufig ebenfalls ablehnend verhalten. Man gliedert die Hämosporidien, oder einen Teil dieser Gruppe, mit den Trypanosomen zusammen als Ordnung der Binucleata den Flagellaten an. Wir vermögen diese Ordnung der Binucleata aus verschiedenen Gründen nicht anzuerkennen und möchten uns für die Beibehaltung der Hämosporidien in der Unterklasse der Telosporidien aussprechen. Wenn auch zugegeben werden muß, daß gewisse Verwandtschaftsbeziehungen zwischen Hämosporidien und Trypanosomen und andererseits Flagellaten existieren, so sind derartige entfernte Verwandtschaftserscheinungen auch mit den Rhizopoden vorhanden, so daß man die Hämosporidien schließlich auch zu den Rhizopoden stellen könnte. Die Hämosporidien sind aber durch viele, infolge ihrer parasitären Lebensweise hervorgerufenen Eigenschaften und durch ihren Entwickelungszyklus so gut charakterisiert, daß sie nicht leicht von den übrigen Sporozoen getrennt werden können. Gegen diese Vereinigung der Hämosporidien mit den Trypanosomen ist weiterhin noch einzuwenden, daß das Vorkommen von Blepharoplasten durchaus nicht bei den Flagellaten nur auf die Binucleaten beschränkt ist. Es erscheint weiterhin nicht vorteilhaft zu sein, auf die immerhin nicht völlig geklärten Kernverhältnisse hin, einen Teil

der Ordnung der Hämosporidien aus ihrem Zusammenhang mit den übrigen Sporozoen herauszureißen und in einer Gruppe unterzubringen, deren Vertreter in der Mehrzahl der Fälle einen von den Hämosporidien sehr verschiedenen Bau besitzen.

Literatur. *Wichtigste allgemeine Literatur über Sporozoen:* **Bütschli**, *Protozoen. Bronn's Klassen und Ordnungen des Tierreiches, 1883 bis 1887. Ausführliches Literaturverzeichnis bis 1882.* — **Calkins**, *The Protozoa. New York 1901.* — **H. Delage et E. Hérouard**, *Sporozoaires. In Traité de Zoologie concrète. Vol.* 1, *Protozoa, 1896.* — **Doflein**, *Lehrbuch der Protozoenkunde, 3. Aufl. Jena 1911.* — **Hagenmüller**, *Bibliotheca Sporozoologica. Ann. Mus. Hist. nat. Marseille (2) Bulletin. Vol.* 1, *Livr. 2, 1899. Ausführliches Literaturverzeichnis bis 1. Januar 1899.* — **Labbé**, *Sporozoa. In: Das Tierreich, 1899, Lief. 5, Berlin. Ausführliches Literaturverzeichnis.* — **Lang**, *Vergleichende Anatomie, 2. Aufl., 1. Lief. Protozoen, 1901. Neue Auflage im Erscheinen.* — **Lühe**, *Ergebnisse der neueren Sporozoenforschung. Jena 1900.* — **Lühe**, *Die im Blute schmarotzenden Protozoen und ihre nächsten Verwandten. In Mense, Handbuch der Tropenkrankheiten, Bd.* 3, *1906.* — **Minchin**, *Sporozoa. In Ray Lankester, A Treatise on Zoology. Part. I, Fasc. 2, 1903.* — **v. Prowazek**, *Handbuch der pathogenen Protozoen. Leipzig 1912. — Die neueste Literatur über Protozoen ist zu finden: Bibliographia zoologica. — Zoologischer Jahresbericht der Neapler Station. — Zoological Record. — Archiv für Protistenkunde.*

Gregarinen (Eugregarinen): **Brasil**, *Recherches sur la réproduction des Grégarines monocystidées. Arch. de Zool. exp. et générale (4), T. 3, 1905.* — **Hesse**, *Contribution á l'étude des Monocystidées des Oligochètes. Arch. Zool. exp. (5), Tome 3, 1909.* — **Labbé**, *In: Tierreich, 5 Lief. Sporozoen (ausführliches Literaturverzeichnis, 1899.* — **Léger**, *La réproduction sexuée chez les Stylorhynchus. Arch. f. Protistenkunde, Bd.* 3, *1904.* — **Léger et Duboscq**, *Étude sur la sexualité chez les Gregarines. Arch. f. Protistenk., Bd.* 17, *1909.* — **Lühe**, *Bau und Entwickelung der Gregarinen. Arch. f. Protistenk., Bd.* 4, *1904.* — **Mulsow**, *Ueber Fortpflanzungserscheinungen bei Monocystis rostrata n. sp. Arch f. Protistenk., Bd.* 22, *1911.* — **Pähler**, *Ueber die Morphologie, Fortpflanzung und Entwickelung von Grégarina ovata. Arch. f. Protistenk., Bd.* 4, *1904.* — **Schellack**, *Entwickelung und Fortpflanzung von Echinomera hispida. Arch. f. Protistenk., Bd.* 9, *1907.* — **Derselbe**, *Gregarinen. In Prowazek, Handbuch der pathogenen Protozoen, Lief. 4, 1912.* — **Schnitzler**, *Ueber die Fortpflanzung von Clepsidrina ovata. Arch. f. Protistenk., Bd.* 6, *1905.* — **Siedlecki**, *Ueber die geschlechtliche Vermehrung der Monocystis ascidiae. Bull. de l'Acad. des Sciences de Cracovie, 1899.*

Schizogregarinen: **Brasil**, *Recherches sur la cycle évolutif des Selenidiidae. Arch. f. Protistenk., Bd.* 8, *1907.* — **Fantham**, *The [illegible], a review and a new classification. Parasitology, Bd.* 1, *1908.* — **Moroff**, *[illegible] vorkommenden [illegible]gataarten usw. Arch. f. Protistenk., Bd.* 11, *1908.*

Coccidien: **Labbé**, *Recherches zoologiques, cytologiques et biologiques sur les Coccidies. Arch. zool. expér. et génér. (3), Vol.* 4, *1897.* — **Léger**, *Le genre Eimeria et la classification des Coccidies. Compt. rend. Soc. Biol. Paris (10), Vol.* 52, *1900.* — **Lühe**, *Die Coccidienliteratur der letzten vier Jahre. Zool. Centralbl., Bd.* 10, *1903.* — **Minchin**, *Sporozoa. In: Lankesters Treatise on Zoology, 1903.* — **Reichenow**, *Haemogregarinen. In: Prowazek, Handbuch der pathogenen Protozoen, 1912.* — **Reich**, *Das Kaninchencoccid. Eineria stiedae. Arch. f. Protistenk., Bd.* 28, *1913.* — **Schaudinn**, *Untersuchungen über den Generationswechsel der Coccidien. Zool. Jahrb., Abt. f. Anat., Bd.* 13, *1900.* — **Derselbe**, *Studien über krankheitserregende Protozoen. I. Cyclospora caryolytica. Arbeiten aus dem kaiserlichen Gesundheitsamt, Bd.* 18, *1902.* — **Schaudinn und Siedlecki**, *Beiträge zur Kenntnis der Coccidien. Verh. d. deutsch. Zool. Ges., 1897.* — **Schellack und Reichenow**, *Coccidienuntersuchungen. I. Barrouxia schneideri. Arb. a. d. kaiserl. Gesundheitsamt, Bd.* 44, *Heft 1, 1913.* — **Schuberg**, *Die Coccidien aus dem Darm der Maus. Verh. d. naturf. med. Ver. Heidelberg 1895.*

Cnidosporidien: **Auerbach**, *Die Cnidosporidien. Leipzig 1910. (Mit sehr ausführlichem Literaturverzeichnis.)* — **Doflein**, *Studien zur Naturgeschichte der Protozoen. III. Ueber Myxosporidien. Zool. Jahrb., Abt. f. Anat., Bd.* 9, *1898.* — **Derselbe**, *Lehrbuch der Protozoenkunde, 3. Aufl., 1911.* — **Keysselitz**, *Die Entwickelung von Myxobolus pfeifferi. I. u. II. Teil. Arch. f. Protistenk., Bd.* 11, *1908.* — **Schröder**, *Cnidosporidien. In: Prowazek, Handbuch der pathogenen Protozoen, 3. Lief., 1912.* — **Stempell**, *Ueber Nosema bombycis. Arch. f. Protistenk., Bd.* 16, *1909. (Literaturverzeichnis).* — **Thélohan**, *Recherches sur les Myxosporidies. Bull. scient. France Belg. Tome 26, 1895. (Gutes Literaturverzeichnis).*

Sarkosporidien: **Bertram**, *Beiträge zur Kenntnis der Sarkosporidien. Zool. Jahrb., Abt. f. Anat., Bd.* 5, *1892.* — **Erdmann**, *Beiträge zur Morphologie und Entwickelungsgeschichte des Hammelsarkosporids in der Maus. Centralbl. f. Bakt. Abt. 1, Bd.* 53, *1910.* — **Hagenmüller**, *Bibliotheca sporozoologica. Ann. Mus. H. nat. Marseille, Serie 2, Bd.* 1, *Suppl. Marseille 1899.* — **Labbé**, *Sporozoa. Das Tierreich, 5. Lief., 1899.* — **Teichmann**, *Sarcosporidia. In Prowazek, Handbuch der pathogenen Protozoen, 3. Lief. Leipzig 1912. (Ausführliches Literaturverzeichnis).*

C. Tönniges.

Sprengel

Kurt Polykarp Joachim.

Geboren am 3. August 1766 zu Boldekow bei Anklam. Er studierte von 1785 bis 1787 in Halle zunächst Theologie, bald aber Medizin. Zwei Jahre später wurde er daselbst außerordentlicher, 1795 ordentlicher Professor der Botanik. Er starb ebendort am 15. März 1833. Sprengel ist

der Verfasser überaus zahlreicher botanischer und medizinischer Werke. Die ersteren sind z. T. systematischer und floristischer Natur, von denen nur die Neuausgabe von Linnés „Systema vegetabilium" (1825 bis 1828) und der „Genera plantarum" sowie die „Flora Halensis" (1806) erwähnt seien. Unter seinen pflanzenanatomischen Arbeiten ist die „Anleitung zur Kenntnis der Gewächse" (1802 bis 1804; 2. Auflage, 3 Bde., 1817 bis 1818) die wichtigste, die vielfach anregend wirkte, obwohl in ihr neben Richtigem viel Verfehltes enthalten war. Als sein bedeutendstes Arbeitsgebiet kann wohl das historische bezeichnet werden, welches die „Historia rei herbariae" (2 Bde., 1807, 1808; 1817 bis 1818 in deutscher Sprache als „Geschichte der Botanik" erschienen), der „Versuch einer pragmatischen Geschichte der Arzneikunde" (1. Aufl. Halle 1792 bis 1799) und andere medizinisch-historische Arbeiten behandeln. In ihnen tritt besonders der erstaunliche Kenntnisreichtum Sprengels, auch in linguistischer Beziehung, hervor.

W. Ruhland.

Sprengel

Christian Konrad.

Geboren zu Brandenburg im Jahre 1750. Er war von 1774 an als Lehrer an der Schule des Friedrichs-Hospitals in Berlin und gleichzeitig an der dortigen Königlichen Militärschule tätig. 1780 wurde er Rektor an der lutherischen Stadtschule in Spandau, wurde jedoch schon 1794 seines Amtes entsetzt und sein Gehalt auf ein Drittel verringert. Er lebte darauf in ziemlich dürftigen Verhältnissen zurückgezogen in Berlin, gab Sprachstunden und veranstaltete gegen geringes Entgelt Exkursionen und Kurse in der Botanik. Er starb daselbst am 7. April 1816. Unter seinen Schriften ist eine über Bienenzucht (1811) erwähnenswert. Von epochemachender Bedeutung jedoch war „Das entdeckte Geheimnis der Natur im Bau und in der Befruchtung der Blumen" (1793), in welchem er als erster die biologischen Zusammenhänge zwischen Insekten und Blüten zum Zwecke der Befruchtung klarlegte und eine durch 25 Tafeln erläuterte meisterhafte Darstellung der in Frage kommenden Einrichtungen gab. Seine Entdeckungen blieben lange fast unbeachtet und wurden erst durch Darwins „Entstehung der Arten" wieder ans Tageslicht gezogen und seither nach Gebühr gewürdigt.

W. Ruhland.

Sproß.

1. Sproß, Cormus, Thallus. 2. Phyllotaxie. Ueber spiralige und wirtelige Blattstellungen. 3. Anisophyllie, Anisokladie. 4. Longitudinale Entfernungen der Blätter. 5. Laterale und longitudinale Entfernungen der Zweige. Die Richtung derselben. 6. Die Sproßfolge. 7. Die Blütenstände. 8. Die Knospen, Knospendeckung, Knospenlage. 9. Lebensdauer der Sproßachsen. 10. Ueber besonders angepaßte Sprosse: Assimilationssprosse, Speichersprosse, Sprosse der Lianengewächse, Ausläufer und Rhizome, Schutzsprosse, reduzierte Sprosse.

1. Sproß, Cormus, Thallus. Alle Pflanzen sind während der Entwickelung zuerst einzellig. Bei den einzelligen Arten liefert die Zelle bei dem Wachstum neue einzellige Individuen durch Teilung. Bei mehrzelligen Arten wird dagegen durch die Teilung der Embryozelle der mehr oder weniger differenzierte Pflanzenkörper während der Entwickelung aufgebaut. Die Gliederung des Pflanzenkörpers in Organe, welche verschiedene Funktion ausüben, ist in verschiedenen Pflanzengruppen sehr verschieden. Bei den höheren Pflanzen sind z. B. besondere Organe ausgebildet, die der geschlechtlichen Fortpflanzung dienen (Fortpflanzungsorgane), andere, welche die vegetativen Funktionen leisten (vegetative Organe). Bei den Pteridophyten und Blütenpflanzen ist in der Regel die Pflanze in Wurzel und Sproß gegliedert, wobei der Sproß die Fortpflanzungsorgane und die Blätter auf dem Stamm oder der Sproßachse trägt, während die Wurzel die Pflanze befestigt, und für Wasser und die im Boden befindliche Nährstoffe sorgt.

Niederen Pflanzen fehlt die Gliederung in beblätterten Sproß und Wurzel. Die Laubmoose und die meisten Lebermoose haben einen beblätterten Stamm, doch keine Wurzel. Ihr Stamm, der vielfach ebenso wie der Stamm der höheren Pflanzen, als Cormus (deswegen der gebräuchliche, gemeinsame Name Cormophyten) bezeichnet wird, ist jedoch dem Stamm der letzten nicht homolog, indem er unmittelbar die Geschlechtsorgane trägt, welche bei den höheren Pflanzen erst nach der Bildung der Zellkomplexe mit reduzierter Chromosomenzahl auf denselben auftreten. Den Thallophyten fehlt ebenfalls die Wurzel und ihr Vegetationskörper zeigt meistens keine sproßähnliche Gliederung in Blatt und Sproßachse. Bei den chlorophyllosen Pilzen, die aus Hyphen aufgebaut sind, ist nie eine sproßähnliche Gliederung zu finden. Ebensowenig ist bei den meisten chlorophyllführenden Algen eine Differenzierung des vegetativen Körpers in Stamm und Blätter vorhanden; solche Vegetationskörper werden Thallus genannt. Die Formen des Thallus der Thallophyten sind höchst mannigfaltig, in den einfachsten Fällen wie bei den Bacteriaceen, vielen Cyanophyceen und niederen Chlorophyllaceen kugelig, ellipsoidisch, zylinderisch, ohne Gegensatz von Basis und Spitze. Bei den Arten, die an Substrat angewachsen leben, mögen sie auch einzellig bleiben, ist dagegen Basis und Spitze des Pflanzenkörpers, also eine Polarität der Pflanze vorhanden. Die Spitze als Vegetationsscheitel vermittelt

das Wachstum des Thallus. Derselbe kann radiär, bilateral oder dorsiventral, einfach oder auf verschiedene Weise verzweigt werden. Wo die Thalluszweige, wie bei verschiedenen höheren Algen flach, bilateral oder dorsiventral sind, scheint dann der Thallus den Sprossen der Cormophyten ähnlich, vielleicht sogar homolog. Doch ist die Phylogenie der Sproße und Wurzeln der Cormophyten bis heute noch nicht aufgeklärt und deswegen hat Bower vorgeschlagen, die sproß-, blatt- oder wurzelähnliche Thallusteile der Thallophyten nicht Sproß, Blatt oder Wurzel nennen, sondern mit den Namen Caulidium, Phyllidium oder Rhizidium zu belegen.

Der Körper der höheren Pflanzen bleibt nur in den ersten Stadien der Entwickelung, während das Proembryostadium undifferenziert, mit der Bildung des reifen Embryo differenziert er sich zu einer endogen angelegten Wurzel, und zu einem exogen wachsenden Sproß, und diese so früh erfolgte Gliederung besteht während des ganzen Lebens. Nur in seltenen Fällen tritt diese Differenzierung später, wie sonst auf; bei den Orchideen erst längere Zeit nach dem Keimen der Samen, die zunächst zu einem blatt- und wurzellosen thalloidenen Körperchen elllipsoidischer oder länglicher Gestalt, sogenanntem Protokorm, auswachsen (Fig 67).

Der Sproß wächst apikal mit der Vegetationsspitze und bildet an derselben exogen, in akropetaler Folge seitliche Ausgliederungen, die zu Blättern werden, und in der Achsel derselben die Seitensprosse, die nach dem Auswachsen alle zusammen das Sproßsystem der Pflanze bilden (Fig. 1). Manche Sprosse eines Sproßsystems verrichten die vegetative Arbeit, andere, als Blumen ausgebildet, dienen dem generativen Leben, erzeugen Früchte und Samen.

Nachdem die Blattprimordien zu Blättern ausgewachsen sind, verstärken und verlängern sich die subapikalen Teile der Achse des wachsenden Sproßes. Im Gegensatz zu einer Vegetationsspitze kann man unterhalb derselben am Sproß einerseits die Sproßachse (Stamm, Stengel), andererseits die an derselben inserierten Blätter unterscheiden. Eine scharfe Grenze zwischen der Blattbasis und der Sproßachse läßt sich nicht herstellen, da die beiden Organe doch nur Ausgliederungen des Sproßes sind, und die peripheren Lagen der Stengel in das Blattgewebe übergehen. Ganchichaud dachte, daß die Achse eines Sprosses aus zusammengewachsenen Internodien, deren jedes ein Blatt seitlich trägt, bestehe, ein Internodium wäre also aus dem Basalstück des Blattes gebildet zusammen mit der Blattfläche wurde ein Stengelglied von ihm Phyton genannt. Potonié meint, daß die Sprosse höherer Pflanzen phylogenetisch aus den flachen, dichotom gegabelten, fucusähnlichen durch die Uebergipfelung der Gabeläste entstanden sind. Die verkürzten Gabelzweige werden zu Urblättern, die weiterwachsenden, übergipfelten zu Urkaulomen. Die Basalstücke



Fig. 1. Sproßscheitel einer phanerogenen Pflanze. Bei v Vegetationsspitze. f Blattprimordien. g Achselknospenanlagen. Strasburger, Lehrbuch.


Fig. 2. Euphorbia Fournieri. Die Blattstellung $^{2}/_{5}$, die Ortostichen sind sehr deutlich.

der Blätter umwachsen mantelartig die Urkaulome, und durch diesen Perikaulommantel wird aus dem postulierten Urkaulom die Sproßachse der heutigen Cormophyten.

2. Phyllotaxie. Ueber spiralige und wirtelige Blattstellungen. Wird auf einer Durchschnittsfläche des Sprosses, also an der Spitze eines Internodiums nur ein Blatt inseriert, so sprechen wir von einer zerstreuten (auch spiraligen) Stellung der Blätter (Fig 2, 3, 9, 28, 29). Die Ebene, welche durch die Mitte der Insertion des Blattes und



Fig. 3. Blattstellung $^2/_5$. Nach Wossidlo.

durch die Achse des tragenden Sprosses gedacht wird, heißt die Medianebene und die gerade Linie, welche in der Medianebene und an der Oberfläche des Stammes durch den Insertionspunkt des Blattes longitudinal verläuft die Orthostiche. Alle Blätter eines Sprosses sind an einer Reihe von parallelen Orthostichen inseriert, deren Zahl in wenigen Fällen leicht zu finden ist. So sind z. B. die Blätter der Gramineen, in nur einer Medianebene aber an zwei, diejenigen der Cyperaceen an drei, die dekussierten Blätter der Labiateen (Fig. 10A) an vier Orthostichen inseriert. Denkt man sich eine fortlaufende Wendellinie, die Insertionspunkte der nacheinander folgenden Blätter bei zerstreuter Stellung verbindet, so erhält man die sogenannte genetische oder Grundspirale (Grundwendel), welche bei Sprossen mit verlängerten Internodien sehr steil und leicht sichtbar, dagegen bei verkürzten Internodien und dicken Sprossen nur schwer zu konstruieren ist. An der Grundspirale sind alle Blätter eines Sprosses mit zerstreuter Blattstellung inseriert, und ihre lateralen Entfernungen sind durch die Divergenzwinkel der entsprechenden Medianebenen bestimmbar. Indem alle Blätter zugleich an einer bestimmten Anzahl der Orthostichen inseriert sind, kann man von einem Blatt 1 ausgehend, welches an der Orthostiche I inseriert ist die Grundspirale so lange verfolgen, bis dieselbe (vielleicht nach mehreren Umgängen), ein auf der Orthostiche I inseriertes Blatt 1 + n trifft, welches dem Blatte 1 superponiert ist. Die Zahl der Blätter, die auf einer Grundspirale zwischen je zwei auf derselben Orthostiche superponierten inseriert sind wird Abschnitt oder Cyklus genannt und stimmt mit der Zahl der Orthostichen überein.

Die Divergenzen der spiralständigen Blätter werden in der Lehre von der Blattstellung nur selten in Graden, gewöhnlich in den Brüchen des Stengelumfanges an-



Fig. 4. Diagramm der $^2/_5$-Stellung der Blätter. Nach Strasburger.

gegeben. Bei den Gramineen, wo die Blätter auf zwei Orthostichen (distich) um 180° voneinander, also um die Hälfte des Stengelumfanges entfernt sind beträgt die Divergenz $^1/_2$. Die Zahl der Cyklusblätter beträgt 2, und die Grundspirale macht einen Stamm-

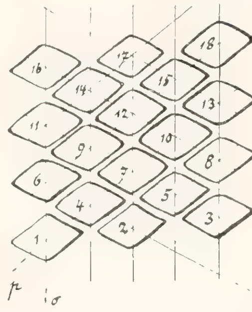


Fig. 5. Die $^2/_5$-Stellung der Blätter auf der aufgerollten Oberfläche der Achse. o Orthostiche, p, p Parastichen. Die Zahlen geben die genetische Aufeinanderfolge der Blätter. Nach Strasburger.

umgang bei demselben. Bei den Cyperaceen sind alle Blätter auf drei Orthostichen (tristich), um 120° voneinander in der Divergenz $^1/_3$ entfernt. Die Zahl der Cyklusblätter beträgt 3 und die Grundspirale macht

einen vollen Umgang dabei. Vielleicht am gewöhnlichsten unter allen Blattstellungsverhältnissen ist die Stellung $^2/_5$ (Prunus spinosa, Rosa, Ribes, Bryonia, Achillea, Millefolium, Quercus, Polygonum tataricum, Chenopodium usw.). Die Blätter stehen auf 5 Orthostichen um 144° also um $^2/_5$ des Stengelumfangs voneinander entfernt (Fig. 2, 3, 4, 5). Die Zahl der

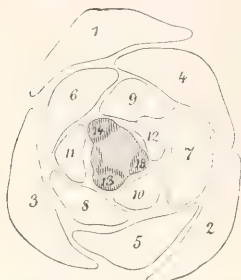


Fig. 6. Tsuga canadensis. Querschnitt durch die Vegetationsspitze. Die Blattanlagen in $^5/_{13}$ Divergenz. Nach Hofmeister.

Cyklusblätter ist 5, und die Grundspirale macht zwei volle Umgänge dabei. Fast ebenso häufig ist die Stellung $^3/_5$ (Euphorbia palustris, Laurus nobilis, Solidago rigida, Ilex Aquifolium, Linum usitatissimum, Raphanus sativus). Dabei hat man 8 Cyklusblätter und drei Umgänge der Grundspirale. Sehr häufig ist bei Pflanzen mit kurzen Internodien die Divergenz $^5/_{13}$, z. B. Artemisia, Absinthium, Convolulus tricolor, Dictamnus albus, Sedum acre, Taraxacum officinale (Fig. 6). Die Blattstellung $^8/_{21}$ findet sich bei Isatis tinctoria, Metrosideros glauca, Sempervivum montanum; $^{13}/_{34}$ bei Sempervivum arboreum, den Hochblättern der Plantago media usw.; $^{21}/_{55}$ bei Encephalartos horridus, den Langtrieben vieler Kieferarten. Die angeführten Blatstellungen gehören zu den häufigst anzutreffenden und bilden die Glieder der Schimperschen Divergenzreihe: $^1/_2$, $^1/_3$, $^2/_5$, $^3/_8$, $^5/_{13}$, $^8/_{21}$, $^{13}/_{34}$, die zwischen den Grenzwerten 180° und 120° sich dem Mittelwerte 137° 30′ 28″ nähern. Aber auch andere Reihen kommen vor, wenn auch minder häufig z. B. $^1/_3$, $^1/_4$, $^2/_7$, $^3/_{11}$ . . . oder $^1/_4$, $^1/_5$, $^2/_9$, $^3/_{14}$ . . . .

Sind bei verkürzten Internodien zahlreiche dicht gedrängte Blätter vorhanden, so kann man die flache Grundspirale oder sogar die Orthostichen nur schwer erkennen, dagegen erscheinen die Blätter an anderen schräg verlaufenden Spirallinien inseriert, die alle steiler als die Grundspirale sind. und in gewisser Zahl vorhanden, aneinander parallel verlaufen. Diese schrägen Zeilen werden Parastichen oder Nebenzeilen genannt. Sehr schön sind die Parastichen an den Blütenköpfchen der Sonnenblume oder an den Zapfen der Koniferen sichtbar. An den Zapfen der Edeltanne stehen alle Schuppen auf drei einander parallelen rechts laufenden Parastichen, nicht minder deutlich sind sie zu 5 steileren links laufenden angeordnet. Bei Picea excelsa (Fig. 7) sind neben linkslaufenden Achterzeilen, nach rechts gerichtete Dreizehnerzeilen vorhanden, während die flachen Dreierzeilen wenig auffallen. Diese deutlichen Parastichen benutzen wir zur leichten Bezifferung der Blätter (in der Nacheinanderfolge derselben auf der wenig deutlichen Grundspirale), und dadurch zum Erkennen der Divergenz derselben. Wird z. B. ein Blatt an der Kreuzungsstelle der nach links laufenden Fünferzeile und der nach rechts laufenden Dreierzeile (Fig. 5) mit O bezeichnet so wird das nächsthöhere auf der Dreierzeile mit O + 3, das weitere mit O + 3 + 3 also mit 6, das noch höhere mit 9 bezeichnet. An der Fünferzeile nach links werden die aufeinander nach oben folgenden Blätter mit 5, 10, 15, 20 . . . bezeichnet. Auf der Dreierzeile, die durch das Blatt 5 nach rechts, der Dreierzeile 3, 6, 9, 12 parallel verläuft, muß natürlich die Bezifferung lauten 5, 8, 11, 14 und auf diese leichte Weise lassen sich alle Blätter beziffern und die Divergenz zwischen je zwei auf der sonst nicht erkennbaren Grundspirale benachbarten bestimmen.

Fig. 7. Picea excelsa. Die Anordnung der Schuppen nach $^8/_{21}$-Stellung. Die Schuppen sind in der genetischen Aufeinanderfolge beziffert. Eine Orthostiche verläuft durch die Schuppen 1, 22, 43, 64 usw. Nach A. Braun.

Die Divergenzen der in aufsteigender Folge gebildeten Blätter sind gewöhnlich auf größeren Längen gleichmäßig gebauter Sproßachsen annähernd gleich groß. Doch sind auch inkonstante Divergenzen bekannt. Bei der Gattung Luzula wechseln

die Divergenzen der Laubblätter in den Grenzen zwischen $^1/_2$ und $^1/_3$ des Stengelumfanges anscheinend regellos, bei dem Uebergang der genetischen Spirale von den Vorblättern der Blüte zu den Kelchblättern treten häufig fremdartige Divergenzen auf, die von der formellen Morphologie **metatopisch** (im Gegensatz zu der **eutopischen** Blattstellung oder Blattdeckung) genannt werden.

Die Grundspirale kann man zwischen die Insertionspunkte der Blätter mit einer Divergenz, die kleiner als $^1/_2$ (180°) ist, auf zwei verschiedene Weisen hinein konstruieren, indem man den kürzeren oder den längeren Weg einschlägt. Bei der tristichen Blattstellung kann man z. B. vom Blatt n zu dem nächst höheren n+1 entweder auf den **kurzen Weg** (120° Divergenz), oder auf dem **langen Weg** (Divergenz 240°) gelangen. Gewöhnlich wird der kurze Weg der Grundspirale eingeschlagen. Da die Grundspirale die Insertionspunkte der Blätter, die in der Mediane der Blattbasis liegen verbindet, so wird die Hälfte der Blattbasis, die in der Richtung der absteigenden Spirale liegt **katodisch**, die andere, in der Richtung der aufsteigenden Spirale liegende **anodisch** genannt. Die Grundspirale ist entweder **rechtsläufig (dexiotrop)** oder **linksläufig (laeotrop)**. Die Richtung derselben ist an den Seitensprossen entweder **gleichläufig (homodrom)** oder **gegenläufig (antidrom)**. Von besonderer Wichtigkeit erscheint noch der Umstand, ob bei den Seitensprossen mit transversalen Vorblättern die Grundspirale vom Vorblatt α zu β auf der hinteren (dem Hauptsproß zugewendeten) Seite, also **hintumläufig (opisthodrom)**, oder umgekehrt **vornumläufig (emprosthodrom)** verläuft.



Fig. 9. **Erythraea Centaurium.** Die Blätter in zweizähligen Wirteln, opponiert und dekussiert. Nach **Strasburger**, Lehrbuch.

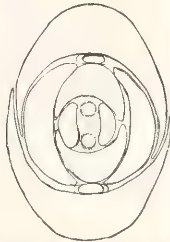
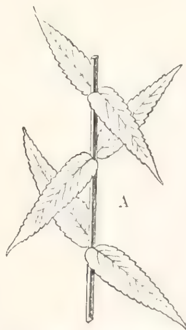


Fig. 8. **Evonymus japonicus.** Scheitelansicht eines Sproßvegetationskegels mit dekussierten und opponierten Blättern. Nach **Strasburger.**

Stehen auf gleicher Höhe der Sproßachse, also auf einem Stengelknoten 2 oder mehrere Blätter, so sind sie **quirlständig** oder **wirtelig** (Fig. 8, 9, 10, 11, 16, 25, 34). Die einzelnen Blätter eines **Wirtels** sind voneinander um gleiche Divergenzwinkel entfernt, die Divergenz derselben beträgt bei zweigliederigen (Fig. 10 A) Wirteln 180° oder $^1/_2$ des Stengelumfanges, bei dreigliederigen (Fig. 10 B) 120° oder $^1/_3$, bei viergliederigen 90° oder $^1/_4$ usw. Am häu-



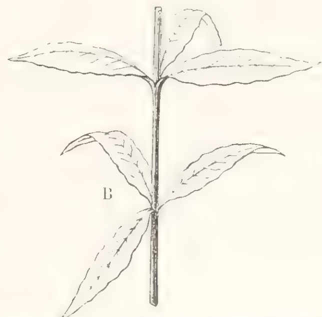


Fig. 10 A. Stengel von **Stachys palustris** mit zweigliederigen Quirlen (dekussierte Stellung), B von der **Lysimachia vulgaris** mit dreigliederigen Quirlen. Nach **Frank.**

figsten sind zweigliederige Quirle also gegenständige Blätter in verschiedensten Familien. dreigliederige sind schon seltener anzutreffen (Juniperus, [Fig. 11] Veronica triphyllos, Nerium), viergliederige (Fig. 12) findet man bei Paris quadrifolia, Lysimachia quadrifolia, höhere Zahlen kommen bei Hippuris, Myriophyllum, Casuarina (Fig. 18), Equisetum vor, bei fossilen Calamites- und Equisetumarten sind sogar Wirtel, die aus über 100 Blättern gebildet sind, vorhanden. Die Blätter übereinander stehender Wirtel stehen in der Regel genau in der Mitte zwischen den Blättern der benachbarten Quirle, mit welchen sie alterieren (interponierte Wirtel), und alle Blätter stehen auf doppelt so viel Orthostichen, als Blätter im Wirtel vorhanden sind. Die gegenständigen Blätter in dekussierten Quirlen stehen auf 4, die der dreigliederigen Wirtel auf 6, der viergliederigen auf 8 Orthostichen angeordnet. Nur selten im Bereiche der vegetativen Region sind superponierte Wirtel vorhanden, bei welchen die Zahl der Orthostichen der Zahl der Blätter eines Wirtels gleich ist, wie z. B. bei den fossilen Sphenophyllaceen oder bei der Euphorbia buxifolia.



Fig. 11. Juniperus communis. Die Blätter in dreigliederigen Wirteln. Nach Schumann.

Die Blätter eines Wirtels werden an der Vegetationsspitze alle gleichzeitig angelegt und dann sprechen wir von simultanen Wirteln, oder eines läuft den anderen in der Entwickelung voran, bei den sogenannten succedanen Wirteln. Indem die folgenden Wirtel alternieren, entsteht das älteste Blatt des nächsten Blattwirtels auf der seitlich nächsten Orthostiche. Die Verschiebung des ältesten Wirtelblattes bleibt bei manchen Familien (Caryophyllaceae, Rubiaceae, Casuarineae) durch alle Wirtel gleichsinnig, und die Insertionsstellen der ältesten Wirtelblätter stehen dann alle auf einer Spirale, oder, wie bei Oleaceen, Melastomaceen, Acanthaceen, Cuphaea die Stellung wechselt von Blattpaar zu Blattpaar. Im zweiten Fall, z. B. bei Fraxinus, stehen die ersten Blätter der succedanen Wirtel alle auf zwei benachbarten um 90° entfernten Orthostichen, und zeugen eine sonst nicht sichtbare Dorsiventralität der Sprosse an.



Fig. 12. Paris quadrifolia. Die Blätter in vierzähligem Wirtel. Nach Strasburger, Lehrbuch.

Die Zahl der Wirtelblätter steht in einem Verhältnis zur Stärke des Vegetationstriebes,

von dieser sind also die Divergenzwinkel der Blätter in betreffenden den Fällen abhängig. Die unteren Wirtel der jungen Sprosse haben weniger Blätter als die der erwachsenen, die Zahl der Wirtelblätter an den Seitentrieben ist kleiner als an dem Hauptsproß, bei Equisetum hiemale variiert je nach den äußeren Bedingungen die Zahl der Wirtelblätter zwischen 5 bis 22. Die Blüten sind entweder gleichzählig oder isomer durch alle Quirle (eu- oder isozyklische Blüten), sehr oft aber ungleichzählig oder heteromer (heterozyklische Blüten), wobei entweder Oligomerie oder Pleiomerie der Wirtelglieder vorhanden ist. Eine sehr häufige Erscheinung ist die Oligomerie des Pistills.

Nicht selten kommt es bei wirtelig beblätterten Pflanzen vor, daß die Wirtelblätter zerstreut inseriert sind, die Morphologen der Schimper-Braunschen Schule betrachteten auch die Wirtel als spiralige Cyklen mit gestauchten Internodien. Da die Wirtel alternieren, so bleibt die genetische Spirale bei dem Uebergang zu dem nächst höheren Wirtel nicht kontinuierlich, sondern erfährt zwischen dem letzten Blatt des unteren Wirtels (Cyclur) und dem ersten (Cyclarch) des nächst höheren eine Veränderung die Prosenthese genannt wurde.

Mit den echten Wirteln sind die Scheinquirle (Fig. 13) nicht zu verwechseln, die dadurch zustande kommen, daß bei zerstreuter Beblätterung die Internodien zwischen einer Reihe der Seitenglieder verkürzt bleiben, wodurch die entsprechenden Blätter (oder Aeste) etagenförmig gruppiert und von dem nächsten Scheinquirl durch ein langes blattloses Internodium getrennt sind. Schön sind die Scheinquirle an der jetzt häufig kultivierten Impatiens Oliveri ausgebildet, zu Scheinquirlen angeordnete Seitenzweige zeigen unsere Coniferen.

Die Stellung der Seitensprossungen an dorsiventralen Sprossen. Die Blattstellungslehre, wie sie oben vorgetragen wurde, wurde durch die Betrachtung der radiär oder bilateral gebauten Sprosse gewonnen, da nur auf diesen die seitlichen Organe in den bekannten regelmäßigen Divergenzen vorkommen. Doch nicht minder häufig sind dorsiventrale Sprosse vorhanden, bei welchen die eine Längshälfte anders als die andere gebaut und derselben nicht symmetrisch ist. Die eine Seite solcher Sprosse wird Bauch-, die andere Rückenseite genannt, und die augenfälligen Differenzen beider sind durch verschiedene Ursachen bedingt, indem die Farbe, Konsistenz, Querschnittsfläche, der



Fig. 13. Impatiens Olivieri. Stamm mit zwei Scheinwirteln. Die Blattflächen sind abgeschnitten.



Fig. 14. Pilea muscosa. Die Blätter sind gegenständig, anisophyll. In den Achseln der kleineren Blätter entwickeln sich die starken Seitensprosse.

Bau, die longitudinale oder laterale Entfernung der Seitensprossungen verschieden sind, die Insertion der Blätter schief, die Achselknospen verschoben, die Internodien einseitig gebogen sind, und indem endlich die eine Seite Sprossungen anderer Dignität als die andere hervorbringt.

Die dorsiventralen Rhizome der kriechenden oder kletternden Farne bringen an der Rückenseite die Laubblätter zickzackartig in zwei longitudinalen Zeilen, auf der Bauchseite die Wurzel hervor. Die blattähnlichen Sprosse der Utriculariaarten bilden die Blattanlagen auf zwei seitlichen Flanken, auf der Rückenseite neue Sprosse, auf der Bauchseite nur die Haare. Die anisophyllen Selaginellaarten haben anisophylle, in vier Längszeilen stehende Blätter. Auf der Rückenseite des Sprosses verlaufen die beiden Zeilen der kleinen Blätter, auf den Flanken die zwei anderen mit größeren Blättern. Die Insertionslinien der Blätter der Seitenzweige der Buche sind schief nach unten gerichtet, ihre Achselknospe ist gegen die Rückenseite verschoben. Sehr zahlreich sind die Fälle der dorsiventralen Ausbildung der Blütenstände und der Blüten.

3. Anisophyllie, Anisokladie. Mit der Dorsiventralität der Sprosse ist häufig die Anisophyllie der Laubblätter verbunden. Sind von den Blättern eines Blattwirtels oder von zerstreuten Blättern der Achse manche ihrer Lage nach fest bestimmte anders als die benachbarten ausgebildet, z. B. kleiner oder rudimentär, so reden wir von der Anisophyllie der Blätter, die lateral oder habituell sein kann. Laterale Anisophyllie findet sich an den Seitenzweigen radiärer Sprosse und ist von deren Lage zum Hauptsproß- von der Lichtlinie und vom Licht abhängig. Bei den dekussiert beblätterten Ahorn- oder Aesculusarten sind die lateral inseriert Blätter an schiefen Seitenästen, annähernd gleich, dagegen erfahren diejenigen der Bauchseite eine Vergrößerung der Blattspreite, diejenigen der oberständigen Rückenzeile eine leicht merkbare Verkümmerung. Habituell ist die Anisophyllie der Pilea- oder Goldfussiaarten, die an allen Sproßachsen ohne Rücksicht auf ihre Lage zum Horizont ausgebildet ist (Fig. 14, 15).

Mit der Erscheinung der Anisophyllie ist manchmal die der Anisokladie eng verbunden. Die Achsenknospen der anisophyll beförderten oder retardierten Blätter sind in ihrer Entwickelung, trotz der unmittelbaren Nähe verschieden ausgebildet. Bei Elatostemma (Fig. 15) sind diejengen der großen Blätter befördert, umgekehrt bei der Pilea die Achselsprosse der verkümmerten Blätter (Fig. 14). Doch auch ohne die Anisophyllie kommt häufig die Anisokladie vor als Ausdruck der Dorsiventralität der Achse. Bei zahlreichen tropischen Gewächsen mit opponierten Blättern wachsen



Fig. 15. Elatostemma Junghuhniana. Sproßstück mit anisophyllen Blättern. Die Blätter stehen in Paaren, das eine Blatt jedes Paares bleibt ganz klein, nur in den Achseln der gegenüberstehenden, großen entwickeln sich die Seitensprosse.

nur die Achselknospen der Bauchzeile zu Dornen (Catha. Fig. 22) oder reizbaren Kletterhacken (Unkaria) hervor. Dagegen kommt die Anisokladie der Beisprosse auch an radiären Sprossen vor.

Man unterscheidet mit Sachs Pflanzenachsen, die in der Richtung der Lotlinie und andere die zu dieser schief oder transversal wachsen. Die ersten sind die orthotrope, die anderen die plagiotrop wachsenden. Die Mehrzahl der orthotropen Sprosse ist radiär, die Mehrzahl der plagiotropen dorsiventral symmetrisch. Bei manchen ist die Dorsiventralität habituel, bei anderen durch die Schwerkraft induziert und wenigstens in jungen Stadien umkehrbar. Es sind jedoch auch orthotrope Sprosse bekannt die dorsiventral sind (kletternde Farnrhizome), oder plagiotrope die radiär sind (Rhizome der Schachtelhalme). Nicht nur die Schwerkraft, sondern auch die einseitige Wirkung des Lichtes oder Wassers sind imstande die dorsiventrale Ausbildung der Sprosse zu induzieren.

Die Lehre von den Blattstellungen oder die Phyllotaxie hat es trotz der sehr reichen Fülle des beobachteten Materials noch nicht zu befriedigenden Schlüssen gebracht. Anfangs (Bonnet bis Hanstein) suchte sie die Nützlichkeit der gegebenen Blattstellung für die Pflanze zu ergründen. Nachträglich

in den Dezennien der idealistischen Morphologie suchten Schimper und A. Braun, die Brüder Bravais und Naumann nach mathematischen Gesetzen, welche die Blattstellung wenigstens an radiären Achsen bestimmen. Für die beiden ersten war es die „Spiraltendenz“ des Wachstums in der genetischen Spirale, während die Bravais auch an den Anschluß in Nebenzeilen, Naumann an den Anschluß in den vertikal sich fortsetzenden Orthostichen zunächst dachten. W. Hofmeister versuchte die Frage durch entwickelungsgeschichtliche Untersuchungen der wachsenden und sich differenzierenden Vegetationsspitze näher zu beleuchten, wonach durch S. Schwendener die „mechanische Theorie der Blattstellungen“ geschaffen wurde, welche auf folgenden Punkten basiert: 1. der relativen Größe der Anlagen, 2. dem Kontakt der neuen Organe mit den vorhergehenden, 3. den geringen Schwankungen der Querschnittsgröße zugunsten der Raumausfüllung. Doch hat man auch gegen die Postulate der Schwendenerschen Juxtaposition- oder Anschlußtheorie wichtige Bedenken erhoben.

Ueber die kausalen Bedingungen, die veranlassen, daß an einer Stelle der Vegetationsspitze die Meristemzellen zu spezifischen Teilungen angeregt werden und nachträglich ein über die Oberfläche hervortretendes Primordium bilden, wissen wir bis heute gar nichts. Doch sind diese Bedingungen sicher korrelativ mit verschiedenen Vorgängen in der wachsenden Pflanze verbunden, und sind in genügend plastischen Fällen durch äußere Einflüsse beeinflußbar. Die experimentelle Phyllotaxie existiert aber heute erst in Anfängen.

4. Longitudinale Entfernung der Blätter. Die jungen Blattprimordien werden an der Vegetationsspitze dicht über- und nebeneinander angelegt, bei späterem Wachstum aber mehr oder weniger auseinander geschoben. Die Querscheiben der Achsen, an welchen das Blatt angeheftet ist, werden Knoten (Nodien) genannt, die blattlosen Achsenstücke zwischen je zwei aufeinander folgenden Knoten, werden als Internodien oder Interfoliarstücke der Achse bezeichnet. Die spezifische Länge der Internodien, wenn auch unter dem Einflusse äußerer Bedingungen in gewissem Grade plastisch, bestimmt den Habitus der Jahrestriebe und zum Teil der denjenigen der ganzen Pflanze. Nicht immer werden deutliche Internodien gebildet; wird die Blattbasis mit dem Wachstum des Blattes zu einem breiten Blattkissen und berühren sich die Blattkissen benachbarter Blätter (Cykadeen, Coniferen, viele Palmen), so sind keine Interfoliarstücke der Achsen vorhanden. Ebenso bei vielen Rosettenpflanzen mit gestauchten Internodien (Sempervivum). Bei gestreckten Internodien sind die Längen derselben, oder eigentlich die Verhältnisse der Länge der aufeinander folgenden Internodien, bei verschiedenen Pflanzen sehr verschieden. Bei den orthotropen Trieben ist gewöhnlich ein Maximum der Internodienlänge zwischen den mittleren Blättern des Triebes zu sehen, während von dieser Stelle in basipetaler und akropetaler Richtung die Internodien immer kürzer werden. Sehr schön ist solche Regelmäßigkeit an den hohen Stämmen der Palmen, oder Bambuse sichtbar. Die eingipfelige Kurve, welche die Internodienlänge des Triebes in solchem Falle darstellt, wird in eine zweigipfelige umgewandelt, falls wie bei den Gramineen ein terminaler Blütenstand gebildet wird. In solchen Fällen wachsen eines oder mehrere der apikalen Internodien sehr bedeutend in die Länge, wodurch der Blütenstand nach oben emporgehoben wird. Bei Molinia coerulea (Gramineae) wird sogar dieses apikale Internodium mehrere hundertmal länger, als die tiefer liegenden. Umgekehrt sind bei den plagiotrop wachsenden Trieben häufig die unteren Internodien die längsten, z. B. die langen basalen Internodien der Ausläufer der Androsace sarmentosa (Primulaceae) oder Fragariaarten (Rosaceae). Auch bei den Bäumen mit sympodial verzweigten horizontal wachsenden Seitenzweigen verlängern sich die basalen Internodien (Hypopodien) bedeutend, wodurch ähnlich wie bei den erwähnten Ausläufern, ihre apikalen dichter gestellten Blätter nach außen aus dem Schatten der Mutterpflanze gebracht werden (Fig. 36).

Bei den periodisch wachsenden Trieben, die im Verlaufe einer Periode verschiedene Blattformen (z. B. Niederblätter und Laubblätter) bilden, treten die Differenzen der Internodienlänge beider Regionen stark hervor. Solange die Niederblätter des Schutzblattes die Knospe umhüllen, sind ihre Internodien immer gestaucht und können auch nach dem Abfall der Niederblätter verkürzt bleiben (Birne, Buche, Roßkastanie), unterhalb der langen Internodien der Laubblätter (Fig. 16). Oder aber, wie bei Lepidadenia (Lauraceae) verlängern sich nachträglich die Internodien der Niederblätter bedeutend, dagegen bleiben die Internodien der fast in Etagen stehenden Laubblätter verkürzt (Fig. 17).

5. Laterale und longitudinale Entfernungen der Zweige. Werden alle Achselknospen zu Seitenzweigen, so sind natürlich die seitlichen Entfernungen der Zweige denjenigen der Blätter gleich. Häufig sind in den Blütenständen solche Verzweigungen anzutreffen, seltener in der vegetativen Region. Bleiben die Achselknospen verschiedener Blätter ruhend, so resultieren, was die

Symmetrie der Verzweigung anbelangt, drei Möglichkeiten, indem diese radiär, bilateral oder dorsiventral ausgebildet sein kann.

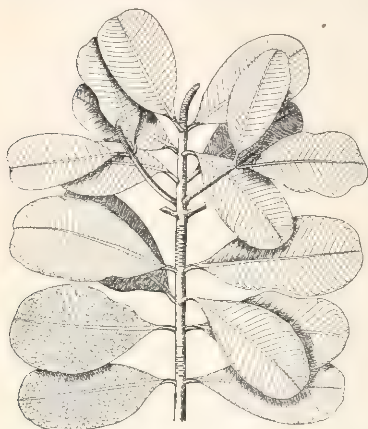


Fig. 16. Mammea americana. Die longitudinale Entfernung der Laubblätter ist größer als die der abfallenden Niederblätter.



Fig. 17. Lepidadenia Blumei. Die longitudinale Entfernung der Laubblätter ist kleiner als die der großen und bleibenden Niederblätter.

Die radiäre Verzweigung, bei orthotropen Sprossen häufig, kommt sowohl bei der Wirtel- wie bei der Spiralstellung der Blätter vor. Bei vielen Rubiaceen mit opponierten und dekussierten Blättern entwickelt sich nur ein Seitenweg in der Achsel des einen Blattes des Wirtels. Alle Seitenzweige stehen ebenso wie die Blätter auf vier Orthostichen, doch so angeordnet, daß die benachbarten voneinander um 90° in derselben Richtung entfernt sind, daß also der fünfte Zweig oberhalb des ersten auf derselben Orthostiche sich entwickelt. Trotz der wirteligen Blattstellung kommt eine spiralige Zweigstellung $^1/_4$ zustande. Bei der wirtelig beblätterten Acacia verticillata (Leguminosae) stehen die Seitenzweige infolge der Zweiglosigkeit der meisten Blätter auf fünf Orthostichen, die, um 144° voneinander entfernt, eine spiralige Zweigordnung $^2/_5$ liefern. Bei Casuarina sumatrana, die vierblätterige Wirtel besitzt, stehen die Seitenzweige in der spiraligen Anordnung auf acht Orthostichen, die um 135° voneinander entfernt sind, so daß eine $^3/_8$ Spiralstellung resultiert (Fig. 18). In allen diesen Fällen stehen die Seitenzweige auf einer regelmäßig steilen Spirale, während von jedem Blattwirtel nur ein Blatt zweigtragend ist. Die Spirale wird noch steiler, falls zwischen den zweigtragenden Wirteln zweiglose stehen bleiben, wie bei den starken Cupressussprossen, deren Zweige in $^1/_4$ Spirale angeordnet sind (Fig. 19). Bei der spiraligen Blattstellung kommt es, falls die Zweige nicht in allen Blattachseln entstehen, zu einer radiären Zweiganordnung in allen jenen Fällen, wo auf eine Periode der zweiglosen Blätter die Bildung der zweigtragenden erfolgt. Auf diese Weise werden die Zweige in sogenannten unechten Wirteln etagenförmig im Verlaufe einer flachen Spirale gebildet, wie es die orthotropen



Fig. 18. Casuarina Sumatrana. Die Blätter in viergliederigen, opponierten Wirteln also auf 8 Orthostichen. Die Zweige auf der $^3/_8$-Spirale.

Sprosse der Coniferen oder Bombaceen zeigen.

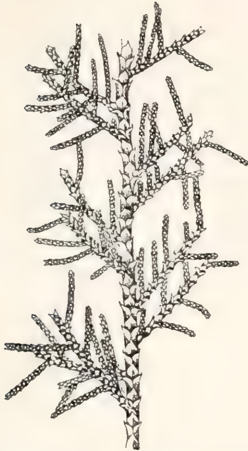


Fig. 19. Cupressus Goveniana. Die Blätter in 2-gliederigen, dekussierten Wirteln. Die Seitenzweige auf einer $^1/_4$ Spirale, durch je 2 Blattwirtel voneinander getrennt.

Bilaterale Verzweigung tritt natürlich bei orthotropen zweizeilig beblätterten Sprossen auf, doch auch bei anderen Blattstellungen kann solche laterotrophe Verzweigung resultieren, z. B. an schwachen opponiert und dekussiert beblätterten Cupressuszweigen, oder bei Selaginellaarten. Bei solchen zweizeilig beästeten Cupressuszweigen (Fig. 20) wird zwischen die nur je einen Zweig tragenden Blattquirle eine unpaare Zahl der zweiglosen Blattwirtel eingeschaltet.

Dorsiventrale Verzweigungen sind sehr häufig an plagiotrop-, seltener an orthotrop wachsenden Achsen. Manche der monopodialen, dorsiventralen Verzweigungssysteme sind sehr regulär und einfach, so die Fälle, in welchen alle Zweige bei wirteliger Blattstellung nur einer oder zwei benachbarten Orthostichen angehören. Bei Fagrea littoralis (Loganiaceae) entspringen an den bogig nach oben gekehrten Seitenästen die Sprosse dritter Ordnung alle hypotroph auf einer Orthostiche nach außen herauswachsend. Bei Cupressus funebris (Fig. 20) an den Kurzsprossen vorletzter Ordnung stehen die letzten Verzweigungsachsen alle übereinander



Fig. 20. Cupressus funebris. Die Blattschuppen in zweigliederigen, dekussierten Wirteln, also auf 4 Orthostichen, die Seitenzweige auf 2 Orthostichen, durch 3 oder durch 1 Blattwirtel voneinander entfernt.

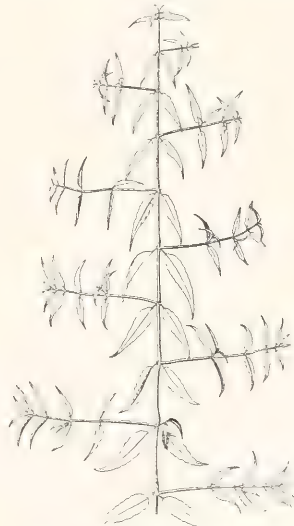


Fig. 21. Climacanthus Burmanii. Monopodiale, dorsiventrale und wickelähnliche Zweigbildung. Die Blätter opponiert und dekussiert, also auf 4 Orthostichen. Die Zweige stehen auf 2 Orthostichen, die um $^1/_4$ Stengelumfang voneinander entfernt sind.

auf einer und zwar der epitrophen Orthostiche. Dorsiventrale Verzweigungen, bei welchen die Seitensprosse auf zwei benachbarten, um 90° voneinander entfernten Orthostichen entspringen, sind bei den Acanthaceen und Rubiaceen vorhanden (Fig. 21). Bei Dorsiventralität der spiralig beblätterten Sprosse, die nach oben gebogen sind, werden die unterwärts liegenden Achselknospen zu Zweigen entwickelt, während die der oberen Blätter ruhend bleiben. Solche Verzweigung, die hypotroph oder exotroph genannt wird, ist sehr häufig; seltener kommt an den Seitenästen der Bäume die epitrophe Verzweigung vor, indem die Blattachsel der oberwärts liegenden Blätter in der Zweigbildung befördert wird. Eine solche kommt bei sogenannten Etagebäumen vor, bei welchen die langen Seitenäste horizontal wachsen (z. B. Eriodendron).

Longitudinale Entfernungen der Zweige. Bei den Blütenpflanzen werden schon an der Vegetationsspitze in den Blattachseln die Primordien der Seitensprosse mit den Primordien der Blätter zugleich oder etwas später angelegt. Es hängt also die Zweiganordnung und longitudinale Entfernung derselben im allgemeinen von der Blattstellung ab. Dabei sind drei Möglichkeiten zu beachten:

a) Die Zahl der sich entwickelnden Seitensprosse ist gleich der Zahl der Blätter.

b) Die Zahl der sich entwickelnden Seitensprosse ist kleiner als die der Blätter, indem manche Achselknospen zu „ruhenden“ Knospen werden.

c) Die Zahl der Aeste ist größer als die der Blätter, indem in der Blattachsel statt einzelner Sprosse „Beisprosse“ sich entwickeln.

Nur im ersten Falle ist die Anordnung der Zweige ganz gleich derjenigen der Blätter, doch sind solche Fälle im Bereiche der vegetativen Verzweigung gar nicht häufig. Sogar bei den Pflanzen, bei denen an starken Sprossen alle Achselknospen sich entwickeln, bleiben solche der untersten Stammblätter ruhend. Beispiele solcher Verzweigung bieten mehrere Rubiaceen und Clusiaceen mit dekussierten Blättern (Coffea, Garcinia) sowie die Gnetaceen (Gnetum gnemon). Bei spiraliger Blattstellung findet sich diese Zweigordnung bei Dryobalonops (Dipterocarpaceae), Elaeodendron (Celastraceae) und anderen (Fig. 22). Die resultierende Zweigbildung ist in allen diesen Fällen sehr dicht, die Seitenzweige werden bald durch die höher stehenden beschattet, um dann zu vertrocknen. Dagegen kommt es im Bereiche der Blütenstände sehr häufig vor, daß die Zahl der Seitenachsen derjenigen der Blätter gleich ist, so z. B. bei den Aehren, Dolden oder Köpfcheninfloreszenzen, oder sogar größer ist als die Zahl des Stützblätter, indem die letzteren abortiert werden, wie bei den Cruciferen.

Wohl am häufigsten bleiben manche Achseln zweiglos, während andere Seitenzweige liefern und dann messen wir die longitudinalen Entfernungen der Seitenzweige mit der Zahl der sie trennenden zweiglosen Blätter.

Die Zweiganordnung ist zwar nie ganz starr, sondern unter dem Einfluß der äußeren Bedingungen, der Stärke der Sprosse, sowie der Lage derselben in gewissen Grenzen plastisch. So sind die Seitenzweige der Colubrina (Rhamnaceae) um je ein zweigloses Blatt, des Zizyphus (Fig. 23) um je zwei zweiglose Blätter voneinander entfernt. Bei Erythroxylon cocca (Fig. 24) kommen auf zwei zweiglose Blättern zwei weitere mit entwickelten Seitenzweigen, dann wieder zwei zweiglose usw. Bei Selaginellaarten sind zwischen je zwei Seitenästen 16 Blätter vorhanden, bei Dyera costulata (Apocynaceae. Fig. 25) sind zwischen je zwei Zweigwirteln 7 bis 12, gewöhnlich 10 zweiglose Blattwirtel vorhanden. Werden die Seitenzweige durch eine größere Zahl von zweiglosen Blättern voneinander entfernt, so sind größere Unregelmäßigkeiten in deren Anzahl anzutreffen, es werden z. B. auf einem Sproß zweiter Ordnung der Araucaria Bidwillii folgende Zahlen gefunden (wobei l zweiglose Blätter, dagegen z die Stützblätter der Seitenzweige bedeutet: 107 l, 2 z, 103 l, 3 z) 99 l, 2 z, 99 l, 2 z, 28 l, 2 z, 89 l, 2 z, 88 l. Aehnlich sind auch die Verhältnisse da, wo die Seitensprosse zu Blüten werden. Bei Nymphaea alba oder Nymphaea zanzibarensis sind zwei übereinander stehende Blüten durch je ein Laubblatt, bei Nymphaea stellata durch je zwei Blätter, bei Nymphaea rubra durch je drei Blätter in longitudinaler Richtung voneinander getrennt.

Stengelknoten. Schwillt ein Teil eines Stengelinternodiums an, und bleibt er, ohne als Speichergewebe zu dienen, länger als die dünneren Nachbarteile wachstumsfähig, so wird er Stengelknoten genannt. Das Gewebe des Stengelknotens reagiert längere Zeit durch Krümmungen auf tropische Reize und infolge solcher Krümmungen erscheinen die Zweige nicht gerade, sondern verschiedenartig gebogen, was besonders bei vielen Spreizklimmern zu beobachten ist. Stengelknoten sind gewöhnlich an der Basis der Internodien (Fig. 26. Silene, Polygonum, Commelina), seltener am apikalen Ende derselben (Gallopsis Tetrachit) oder im mittleren Teil derselben (Salvia elegans, Pilea sp.) entwickelt (Fig. 27). Bei den Gräsern werden Scheidenknoten oder Halm-



Fig. 22. Catha emarginata. Alle Achselknospen der Langtriebe wachsen zu Dornen aus.



Fig. 25. Dyera costulata. Die Blätter in mehrgliederigen Wirteln, die Quirle der Seitenzweige sind durch mehrere zweiglose Blattwirtel voneinander entfernt.

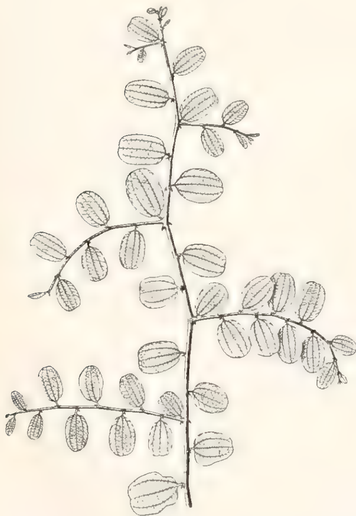


Fig. 23. Zizyphus sp. Siam. Die Seitensprosse der Langtriebe sind voneinander durch je 2 Blätter getrennt, deren Achselknospen ruhend bleiben.



Fig. 24. Erythroxylon Coca. An den Langtrieben mit spiraliger Blattstellung treiben die Achselknospen zwei benachbarter Blätter zu Kurztrieben, die Achselknospen der benachbarten zwei Blätter bleiben ruhend.

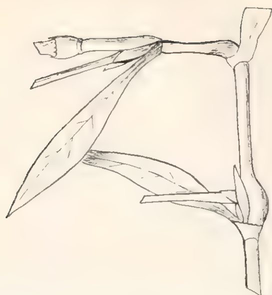


Fig. 26. Polygonum hydropiper. Die Stengelknoten an der Basis der Internodien. Nach Dennert.



Fig. 27. Salvia elegans. Die Stengelknoten in der Mitte der Internodien.

knoten ausgebildet. Die Scheidenknoten, wie solche bei Weizen- oder Haferarten vorhanden sind, entsprechen verdickten Teilen der Basis der Blattscheide, während die Halmknoten (Hirse, Sorghum) durch die Verdickung der Stengelbasis des Internodiums entstehen.

Bedeutende Krümmungen der Zweige, besonders der seitlichen Aeste treten vielfach auf infolge autonomer Prozesse ohne Vermittelung der Gelenke, besonders während der Entfaltung der Blätter (Fig. 28, 29). So sind die jungen Zweige der Ulme, des Corylus und vieler Pflanzen zickzackartig gebogen, wodurch eine günstigere Blattmosaik zustande kommt. Seltener bleiben solche Zweigkrümmungen auch nach vollendeter Streckung der Internodien erhalten wie bei Leucothoearten.

6. Die Sproßfolge. Es gibt Arten, deren primäre Vegetationsspitze nacheinander Laubblätter, Niederblätter, Hochblätter trägt und mit einer Blüte ihr Wachstum schließt, so z. B. die Papaver- oder die einjährigen Anonisarten. Solche Sprosse werden einachsig (haplokaulisch) genannt, mögen sie nachträglich seitliche Achselsprosse bilden oder nicht (Fig. 30A). Wächst dagegen die primäre Vegetationsspitze weiter und schließen die Blüten erst die Seitensprosse zweiter Ordnung, dann haben wir zweiachsige (diplokaulische) Pflanzen, wie Primula, Viola tricolor oder Paris quadrifolia solche sind (Fig. 30B). Bei dreiachsigen (triplokaulischen) Pflanzen (Fig. 30C) schließen die Blumen erst die Achsen dritter Ordnung, so trägt z. B. bei Plantago die Achse erster Ordnung die Laubblätter, in deren Achseln



Fig. 28. Pterospermum acerifolium. Die jungen Zweige sind nicht gerade, sondern an den Nodien zickzackartig gebogen.



Fig. 29. Leucothoe axillaris. Die Zweige sind zickzackartig gebogen.

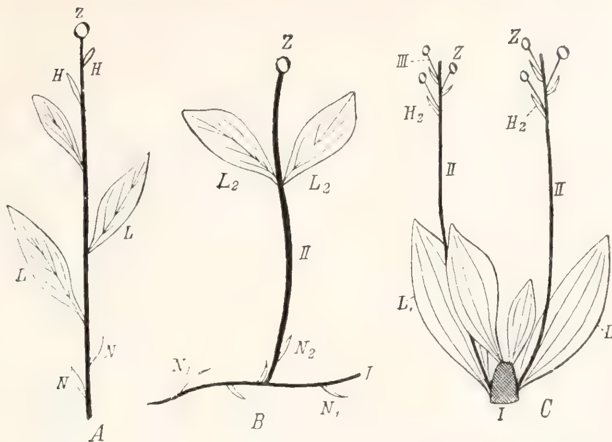


Fig. 30. Sproßfolge. A Schema einer haplokaulischen, B einer diplokaulischen (Paris), C einer triplokaulischen (Plantago) Pflanze. N Niederblätter, L Laubblätter, H Hochblätter. Die römischen Zahlen bezeichnen die relative Aufeinanderfolge der Sproßachsen. Nach Pax.

die Sprosse zweiter Ordnung die Brakteen, tragen, entstehen. Die Blüten sitzen in den Achseln dieser Brakteen, als Sprosse dritter Ordnung. Bei Trifolium montanum schließen die Blüten die Sprosse vierter Ordnung, die Pflanze ist also vierachsig (tetraplokaulisch).

Die Verschiedenheiten der Sproßfolge sind vielfach von hoher systematischer Bedeutung, so ist z. B. Viola silvatica dreiachsig, Viola canina zweiachsig. Doch ist die Frage noch nicht experimentell auf die Konstanz untersucht. Bei vielen Pflanzen deren apikale Knospen in erstarkten Stadien zu Blüten oder Blütenständen werden, während das weitere vegetative Wachstum sympodial erfolgt, erlischt die morphogene Tätigkeit dieser Knospen an jungen und schwächeren Exemplaren ohne Blütenbildung oder mit Bildung der Ranken und Dornen, und erst später an starken sympodialen Gliedern ist die normale Sproßfolge sichtbar. Bei den sympodialgebauten Pflanzen wird die Sproßfolge einer Achse gezählt, ohne Rücksicht auf deren Entfernung von der Vegetationsspitze der Keimpflanze. So sind die Sympodialglieder des Nelumbo einachsig, die der meisten sympodialen Orchideen dreiachsig.

Verhältnis der Länge der Seitensprosse zu dem Hauptsproß. Bildet eine Vegetationsspitze die seitlichen Sprosse zweiter Ordnung, wobei die primäre Achse weiter wächst und neue Seitensprosse produziert, so haben wir es mit der monopodialen Verzweigung zu tun. Bleibt der Sproß erster Ordnung stärker entwickelt als die Seitenzweige, dann ist die Verzweigung racemös, wird dagegen der Sproß erster Ordnung nach der Zweigbildung im Vergleich zu jenen im weiteren Wachstum gehemmt, so ist die Verzweigung cymös. Die Coniferen oder die Birne liefern Beispiele regelmäßiger racemöser Verzweigung.

Die Arbeitsteilung zwischen verschiedenen Sprossen derselben Pflanze führt (sehr häufig) dazu, daß manche derselben, sehr häufig seitliche von beschränktem Wachstumsdauer sind, kurz bleiben und Kurztriebe genannt werden. Die Blüten, Blütenstände, Sproßranken, Sproßdorne sind immer, Assimilationssprosse häufig als Kurztriebe entwickelt.

Die Blätter der Langtriebe des Berberis vulgaris sind zu Dornen umgewandelt, an den Kurztrieben, die aus den Achseln dieser Blattdorne auswachsen, stehen die Laubblätter und Blütentrauben. Bei der Kiefer (Pinus silvestris) sind die Langtriebe mit schuppenartigen Niederblättern bedeckt, in deren Achseln die Kurztriebe (Fig. 31) mit je 2 grünen, nadelartigen Blättern nachträglicherscheinen. Bei anderen Kieferarten produziert ein Kurztrieb 5, 3 oder sogar nur 1 Blatt, während die Lärche oder Cedrus zahlreiche bildet.

Die cymöse Verzweigung zeigen alle Arten, deren primäre Vegetationsspitzen durch Bildung der Blüten oder Blütenstände aufgebraucht sind, wogegen die Seitenknospen

vegetative Zweige liefern. Bei Pflanzen mit gegenständigen Blättern (Aesculus, Syringa) entwickeln sich dann die obersten gegenständigen Knospen zu starken Vegetationstrieben, die etwas voneinander divergieren,

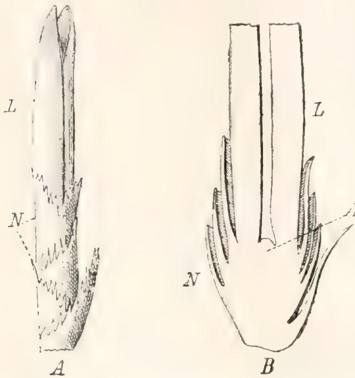


Fig. 31. Pinus silvestris. Kurztriebe der Kiefer. A Habitusbild des zwei Laubblätter bildenden Kurztriebes, B Längsschnitt desselben. N Niederblätter. Nach Pax.

wodurch eine gablige Verzweigung, die Dichasium genannt wird (Fig. 32), entsteht. Manchmal wird solche Verzweigungsart auch unechte oder falsche Dichotomie genannt. Eine echte Dichotomie kommt nur bei manchen Algen, Lebermoosen oder Lycopodiaceen vor (Fig. 33), indem die Vegetations-

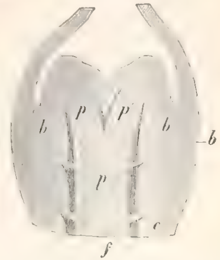


Fig. 33. Lycopodium alpinum. Die Dichotomie der Vegetationsspitze, beide Gabeläste (p′ und p″) sind gleich stark. Nach Hegelmaier.

spitze sich in zwei neue und gleiche teilt, die divergent weiter wachsen (z. B. Stiele der Sporangienähren des Lycopodium clavatum). Während die Gabelung bei Dichasium beim Stillstand der primären Vegetationsspitze durch gleichmäßiges Austreiben zweier seitlicher Achselknospen erfolgt, kann eine unechte Dichotomie auch dadurch zustande kommen, daß eine Seitenknospe ebenso stark als der Haupttrieb sich entwickelnd, diesen dabei etwas zur Seite drängt, was an den Zweigspitzen mancher tropischen Bäume (Gonocaryum, Xanthophyllum) häufig geschieht. Treiben beim Stillstand der primären Vegetationsspitze drei Seitenknospen stark hervor, so entsteht ein Trichasium

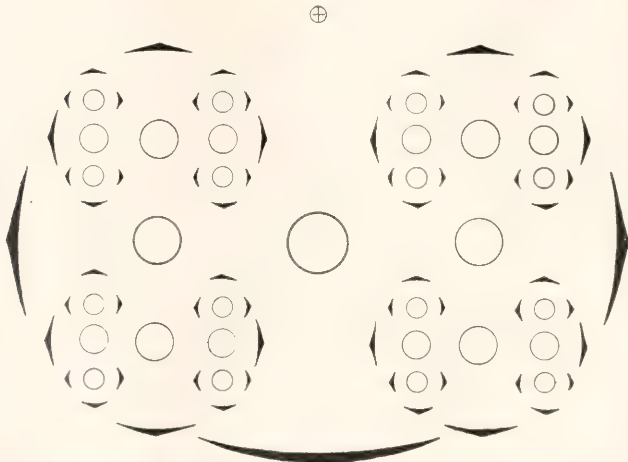


Fig. 32. Diagramm eines Dichasiums. Nach R. Wagner.

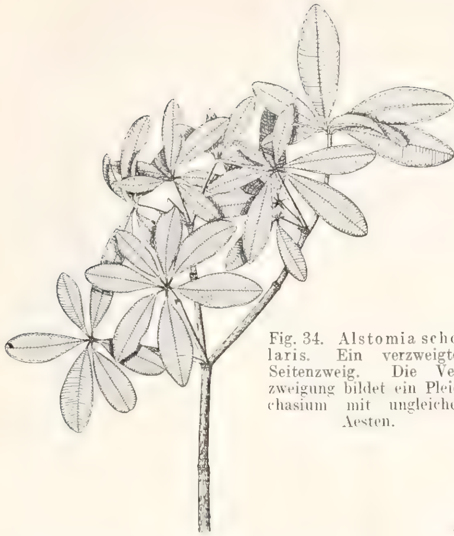


Fig. 34. Alstomia scholaris. Ein verzweigter Seitenzweig. Die Verzweigung bildet ein Pleiochasium mit ungleichen Aesten.

(Nerium Oleander), treiben zahlreiecher Seitenäste, dann haben wir ein Pleiochasium (Fig. 34).

Einen speziellen Fall der cymösen Verzweigung stellt die Bildung des Sympodiums dar. Wächst eine Seitenachse stark und auch sonst dem Muttersproß ähnlich in dessen Verlängerung weiter, während das freie Ende desselben dadurch zur Seite geschoben wird, und wiederholt dieselbe Verzweigung und Wachstumsweise nachträglich der Seitensproß III., IV., V. Ordnung usw., so entsteht ein Zweig, der, wenn auch augenscheinlich einheitlich, doch aus Fußstücken der nacheinanderfolgenden Sympodialglieder, die zu Achsen immer höherer Ordnung gehören zusammengesetzt ist, und ein morphologisches Gegenstück zu einer einheitlichen Achse, dem Monopodium bildet. Jedes Glied der sympodialen Kette besteht aus zwei Teilen, einem Fußstück, das die sympodiale Achse bildet, und dem freien Endstück, das gewöhnlich als Kurztrieb ausgebildet, sonst einem Seitenzweig ähnlich erscheint. Den wahren Sachverhalt lehrt die Insertion der Stützblätter. Auf einem Sympodium erscheinen die vermeintlichen Seitenäste, die in der Tat freie Enden der Hauptsprosse sind, deckblattlos, während die Verlängerungssprosse in den Achseln der Deckblätter stehen.

Die sympodialen Scheinachsen sind sowohl in den Blütenständen, als in den vegetativen Verzweigungen verbreitet. Als einstrahlige Cymen werden sie Monochasien genannt.

Ebenso wie andere Verzweigungen können auch die monochasialen, sympodialen radiär, bilateral oder dorsiventral ausgebildet werden, je nachdem die freien Enden der einzelnen Glieder nach allen Seiten, nach rechts und links oder einseitig gerichtet sind. Dorsiventrale Sympodien sind sehr häufig an seitlichen Aesten verschiedener Bäume (Fig. 35, 36), an unterirdischen Rhizomen, an den kriechenden Aesten vieler Epiphyten (z. B. Orchideen), bilaterale bei einigen Lianen (Villugbea) anzutreffen.



Fig. 35. Monoceras lanceolata. Sympodial wachsender Seitenzweig der Baumkrone. Stark verkleinert.

7. Die Blütenstände oder Infloreszenzen. Nur selten stehen die Blüten einzeln, bald als Terminalblüten die primäre Sproßachse endigend, oder als Axillarblüten in den Achseln der Blätter. Gewöhnlich stehen die Blüten gehäuft nebeneinander, an besonderen Verzweigungssystemen, die Blütenstände oder Infloreszenzen genannt



Fig. 36. Terminalia Catappa. Sympodial wachsender Seitenzweig der Baumkrone; stark verkleinert.



Fig. 38. Plantago lanceolata. Blütenähre. Nach Duchartre.



Fig. 37. Schemata racemoser Blütenstände. A Traube, B Aehre, C Dolde, E Rispe, F Doppeldolde. Nach Strasburger, Lehrbuch.



Fig. 39. Corylus americana. Männliche Blütenkätzchen. Nach Duchartre.

werden, gruppiert. Die Verzweigung und der Habitus der Blütenstände sind in der Regel den vegetativen Verzweigungen sehr unähnlich ausgestaltet, indem im Bereiche der Blütenstände die Laubblätter reduziert, die Internodien verkürzt sind, die Länge der Seitenachsen kurz bleibt, ihre Zahl dagegen ähnlich wie in den, im Bereiche des vegetativen Lebens seltenen Fällen der Polykladie vielfach sehr hoch, ihr Erscheinen gedrängt wird. Trotz aller dieser Merkmale, welche sehr häufig bewirken, daß die Blütenstände von den vegetativen Zweigen scharf abgetrennt erscheinen, sind die Modalitäten der Verzweigung in beiden Fällen die gleichen und die Lehre von der Auszweigung der Gewächse läßt sich nur durch Berücksichtigung der vegetativen Verzweigung und Verzweigung der Blütenstände erzielen.

Der Blütenstand kann auf einer Achse hoch über die Blätter emporgehoben werden. Der blattarme oder blattlose Träger des Blütenstandes wird Schaft (scapus) genannt und kann eine bedeutende Länge erreichen (Aloe, Agave). Die Blütenstandachsen, aus welchen seitliche Zweige auswachsen, werden Rhachis genannt; die Zweige stehen in den Achseln der Deckblätter (Bracteae) und tragen an ihrer Basis Niederblätter, von welchen das erste oder die zwei ersten Vorblätter (Prophyllum) sind. Bei verschiedenen Pflanzen sind die Deckblätter und Vorblätter ganz reduziert, und die Blütenzweige erscheinen an der Rhachis frei, nicht axillär.

Die Blütenstände, die ganz gleichmäßig zusammengesetzt sind, werden einfach oder homotaktisch genannt, in anderen Fällen besteht der Gesamtblütenstand aus verschiedenen Partialblütenständen, es sind die heterotaktischen oder zusammengesetzten Blütenstände.

Einfache Blütenstände. Die einfachen Blütenstände lassen zwei Haupttypen der Verzweigung unterscheiden:

1. Den racemösen oder botrytischen Typus. Monopodiale Verzweigung, die Hauptachse meist unbegrenzt, die Blüten terminal an nicht übergipfelnden Seitenachsen in centripetaler Reihenfolge.

2. Den cymösen Typus. Die Tragachse schließt mit der Terminalblüte, die Seitenzweige übergipfeln die Terminalblüte.

Die botrytischen Blütenstände.

a) Die Traube (Racemus Fig. 37 A). Auf der verlängerten monopodialen Achse entstehen in den Achseln der Tragblätter in akropetaler Folge die einzelnen, gestielten Blüten. Die Gestalt einer Traube hängt ab von der Länge der Internodien, von der Divergenz der Tragblätter (es gibt 2, 3, 4, 5-zeilige Trauben), von der Richtung der Blütenstiele. Eine Traube mit verlängerten unteren Blütenstielen, wodurch die Blüten fast in einer Ebene liegen, heißt Schirmtraube (Corymbus).

b) Die Aehre (Spica) ist eine Traube mit sitzenden Blüten (Fig. 37 B, 38). Die kleinblütigen Aehren der Amentaceen, welche als Ganzes abfallen, werden Kätzchen (Amentum Fig. 39), die in dichter Anreihung dicke Schuppen tragenden Zapfen (Conus Fig. 7), die mit dicker, fleischiger Achse, Kolben (Spadix) genannt.

c) Die Dolde (Umbella) mit verkürzter Hauptachse und unverzweigten, verlängerten, ungefähr dasselbe Niveau erreichenden Blütenstielen (Fig. 37 C, 40).



Fig. 40. Doldiger Blütenstand der Kirsche. Nach Duchartre.

Treten an Stelle der Einzelblüten Dolden auf, so wird die Dolde zusammengesetzt und ihre Partialblütenstände auch Döldchen genannt (Fig. 37 F). Die Tragblätter der Dolde bilden zusammen ein Involucrum, die des Döldchens ein Involucellum, doch können die einen oder die anderen oder beide fehlen.

d) Das Köpfchen (Capitulum) besitzt eine verkürzte, häufig verflachte, halbkugelige oder fast kugelige Hauptachse (Fig. 37 D), auf welcher die Blüten in der Achsel kleiner Deckblätter (Spreuschuppen), oder ohne diese, gedrängt sitzen. Außen ist das Köpfchen von sterilen, verschieden gestalteten Hochblättern, die eine gemeinsame Hülle oder ein Involucrum bilden, geschützt.

Die cymösen Blütenstände:

a) Pleiochasium. Die Hauptachse schließt mit der Blüte. Unterhalb derselben sprossen wenigstens 3 Seitenäste hervor, die ihrerseits mit Blüten abschließen. Werden die unteren Seitenäste eines Pleiochasiums in ihrem Wachstum stark befördert, so daß sie die oberen überragen, wie es häufig bei den Juncaceen der Fall ist, so wird eine Spirre (Anthela) unterschieden. Die einzelnen Teiläste des Pleiochasiums entwickeln nur die Gipfelblüten oder aus den Achseln der Vorblätter Blüten an den Sprossen II., III., IV. usw. Ordnung. Im ersten Fall wird

von Primanpleiochasium, in den folgenden von Sekundan-, Tertian-, Quartan-, Quintanpleiochasien gesprochen. Bleiben die höchsten Hochblätter unterhalb der Primanblüte steril (ohne Achselblüte) so wird das Pleiochasium unterbrochen; bei dekussierten Hochblättern sind auch die Pleiochasien dekussiert, die dreigliederigen Pleiochasien werden auch Trichasien genannt.

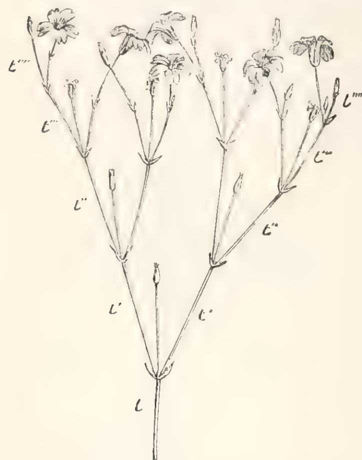


Fig. 41. Cerastium collinum. Dichasium t, t', t'', t''', t'''', die aufeinanderfolgenden Achsen. Nach Duchartre.

b) Dichasium. Die Hauptachse der Infloreszenz schließt mit der Blüte, welche von zwei seitlichen Sprossen (aus den Achseln der Vorblätter oder der höchsten Hochblätter), die wiederum mit Blüten schließen, übergipfelt wird (Fig. 41, 42 E). Man nennt die erste Blüte Priman-, die beiden der dichasialen Zweige Sekundanblüten. Sprossen aus den Vorblättern der letzten weiteren Aeste dichasial, dann folgen die Tertian-, Quintanblüten usw. Sind die dichasialen Aeste ganz verkürzt und sitzen die Blüten gedrängt, wie die Infloreszenzen der Labiaten, so entstehen Scheinwirtel (Verticillaster).

c) Monochasium. Die Hauptachse schließt mit der Blüte. Aus der Achsel eines der obersten Seitenblätter wächst ein Seitensproß vor, der in die Verlängerung der primären Achse fällt, die primäre Blüte zur Seite schiebt, selbst mit der Blüte schließt, unterhalb derselben auf dieselbe sympodiale Weise den Verlängerungssproß bildet usw. Die Monochasien besitzen eine sympodiale Scheinachse, und nach der Lage der sukzessiven Gipfelblüten auf derselben (oder, was dasselbe bedeutet, nach der Lage der Seitenachsen zur relativen Abstammungsachse) sind vier Typen derselben vorhanden.

1) Die Schraube (Bostryx). Die Seitenachsen quer zur relativen Abstammungsachse und in den sukzessiven Ordnungen

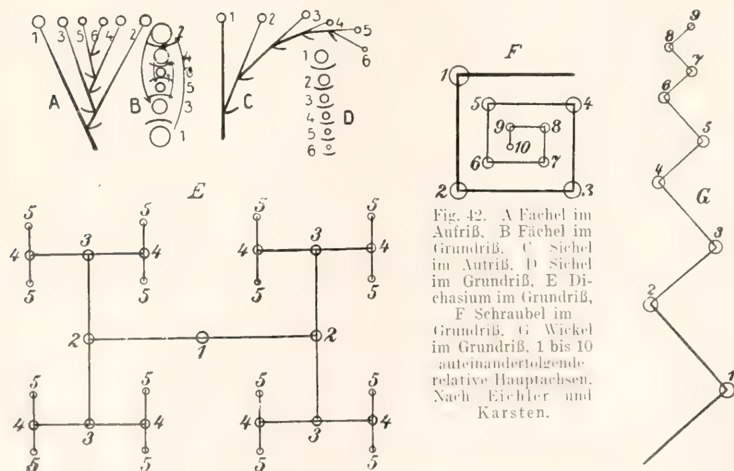


Fig. 42. A Fächel im Aufriß, B Fächel im Grundriß, C Sichel im Aufriß, D Sichel im Grundriß, E Dichasium im Grundriß, F Schraubel im Grundriß, G Wickel im Grundriß, 1 bis 10 aufeinanderfolgende relative Hauptachsen. Nach Eichler und Karsten.

immer auf relativ die nämliche Seite der Abstammungsachse fallend. Die nacheinander folgenden Blüten stehen dann an der Scheinachse an einer spiraligen Linie radiär angeordnet (Fig. 42 F).

2) Der Fächer (Rhipidium). Die Seitenachsen median zur relativen Abstammungsachse, in den sukzesiven Ordnungen immer auf der Rückseite derselben. Die nacheinander folgenden Blüten stehen auf der Scheinachse bilateral auf zwei Orthostichen (Fig. 42 A, B).

3) Der Wickel (Cicinnus). Die Seitenachsen quer zur relativen Abstammungsachse abwechselnd auf die linke und rechte Seite derselben fallend. Die nacheinander folgenden Blüten erscheinen auf der Scheinachse auf zwei Orthostichen dorsiventral angelegt (Fig. 42 G, 43).

4) Die Sichel (Drepanium). Die Seitenachsen median zur relativen Abstammungsachse und immer auf der Vorderseite derselben. Die nacheinander folgenden Blüten erscheinen dorsiventral auf einer



Fig. 43. Symphytum asperrimum. Blütendoppelwickel. Nach Duchartre.

Orthostiche auf der Scheinachse. Eine monochasiale Verzweigungsart, die im Bereiche der Blütenstände nur sehr selten auftritt (Juncus), dagegen häufig in der vegetativen Verzweigungsregion ist (Fig. 42 C, D).

Zusammengesetzte Blütenstände. Wird an Stelle einer einzelnen Blüte in einer Infloreszenz ein Blütenstand entwickelt, so wird die Infloreszenz zusammengesetzt. Die häufigsten Arten der Zusammensetzung sind nach Eichlers Klassifikation folgende:

a) Botrytischer Typus in beiden Graden (Dibotryen). Hierher gehören zusammengesetzte Traube, Aehre, Dolde, sowie Köpfchenähre, Aehrentraube, Aehrenköpfchen usw.

b) Botrytischer Typus im ersten, cymöser im zweiten Grade (Thyrsen, Cymo-Botryen) z. B. Schraubenköpfchen (Allium sp.), Schraubendolde (Bomarea), Wickelähre, Wickeltraube, Dichasiaenähre.

c) Cymöser Typus im ersten, botrytischer im zweiten Grade (Botryocymen) Köpfchenwickel, Köpfchenschraubel, Traubenwickel, Köpfchensichel, Doldenwickel, Doldenschraubeln.

d) Cymöser Typus in beiden Graden (Dicymen), z. B. Schraubenwickel (Geranium), Wickelschraubeln (Alchemilla) usw.

Die Reichhaltigkeit der Formen der Infloreszenzen ist durch die erwähnten, gewöhnlicheren Typen bei weitem nicht erschöpft. Von zahlreichen anderen, die Gegenstand der speziellen Morphologie sind, sei hier noch das Cyathium der Euphorbia als Beispiel eines zusammengesetzten Blütenstandes, der eine einfache zwitterige Blüte nachahmt, erwähnt (Fig. 44).

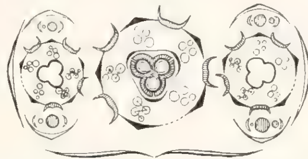


Fig. 44. Euphorbia. Diagramm eines Dichasialzweiges mit drei Cyathien, deren mittleres mit fertiler weiblicher Blüte. Nach Eichler.

In der Mitte desselben steht die gestielte weibliche Blüte, die auf den dreifächerigen Fruchtknoten reduziert ist, die männlichen Blüten bestehen aus je einem nackten, an der Basis gegliederten Staubblatt. Die Staubblätter sind zu je 5 radiären Wickelreihen, in deren Mitte die weibliche Blüte steht, angeordnet. Der ganze Blütenstand ist von einem fünfblätterigen Involucrum umgeben, zwischen dessen freien Blattzipfeln die länglichen oder halbmondförmigen Drüsen sitzen.

8. Die Knospen. Die Vegetationsspitzen werden sowohl während des Wachstums, wie während der Ruheperiode auf mannigfaltige Weise vor der Ungunst der Witterung und schädlichen Eingriffen der Außenwelt geschützt. Bei den wachsenden Vegetationsspitzen wird dieser Schutz in erster Linie durch die jungen Blätter erreicht, die auf der Außenseite stärker als an der Innenseite wachsend mit der konkaven Oberseite die Vegetationsspitze samt den jüngsten Blattprimordien umhüllen. Dadurch kommen diese jungen Blätter mit den benachbarten in einen innigen Kontakt und es wird so der Verschluß der wachsenden Knospe erreicht; die eventuell vorhandenen leeren Stellen werden gewöhnlich mit Haarbildungen, eventuell mit Schleim ausgefüllt.

Nur bei wenigen Blütenpflanzen wächst die Vegetationsspitze fortwährend ohne Perioden der Ruhe durchzumachen, so z. B.

bei den Palmen, Dracaena oder monopodialen Orchideen, sogar in dem gleichmäßigen Tropenklima verläuft die morphogene Tätigkeit der Vegetationsspitzen häufig rhythmisch, in dem nach einer Periode der Bildung seitlicher Aussproßungen die Vegetationsspitze zur ruhenden Knospe wird. In den Gegenden mit periodisch wechselnden trockenen und feuchten, oder kalten und warmen Jahreszeiten sind die ruhenden Knospen als Winterknospen tätig. Nur selten werden die ruhenden Knospen durch gewöhnliche, in der Entwickelung etwas gehemmte Laubblätter geschützt, wie z. B. bei Viburnumarten (dann haben wir nackte oder offene Knospen), am häufigsten wird der Schutz und Verschluß der ruhenden Knospe durch zu Schuppen (Tegmenta) metamorphosierte Blätter, welche eigentliche Schutzblätter darstellen, erreicht. Die Schuppen sitzen auf verkürzten Internodien dicht beisammen, sind hart, braun und sehr widerstandsfähig. Morphologisch sind sie entweder verkümmerte Laubblätter (Syringa), oder erweiterte Blattbasen derselben (Acer) oder metamorphosierte Nebenblätter (Quercus, Fagus). Erhöht wird der Schutz der Knospe durch verschiedene Haare, häufig Lufthaare, aber auch Harz, Gummi oder lackartige Stoffe helfen mit die Knospe zu verschließen. Bei den Achselknospen können sogar die außerhalb der Knospe liegenden Organe sich am Schutz der Knospe beteiligen, so wölbt sich bei den sogenannten Interpetiolarknospen der Grund des Blattstieles über die Knospe kappenförmig (Robinia) oder wulstförmig (Acer Negundo), diese bedeckend. Noch häufiger kommt eine Umwallung der Knospe durch die Stammrinde vor an alten ruhenden Knospen, sogenannten schlafenden Augen, bei Actinidia, Gymnocladus u. a. tritt die schützende Rindenumwallung schon an ganz jungen Knospen hervor. Bei ausdauernden Kräuterpflanzen, deren oberirdische Sprosse im Herbst vertrocknen, tragen zum Schutz der unterirdischen Knospen die toten Ueberreste der grundständigen Blätter, bei deren harte Faser um die Knospe eine windstille Tunika bilden.

Die verschiedenen Knospen einer Pflanze können verschiedene Sprosse liefern. Gewöhnlich zeigt es schon die Gestalt der Knospe an, welche Sprosse sie erzeugen wird, Langtriebe oder Kurztriebe, Dornen, Ausläufer oder Blüten. Man spricht von eine Laubknospe, wenn sie nur Blätter produziert, von eine Blütenknospe, wenn sie eine Blüte oder einen Blütenstand hervorbringen wird, von eine gemischten Knospe, wenn sowohl Blätter als Blüten in denselben angelegt sind.

Je nach der Lage unterscheiden wir endständige oder terminale Knospen von den seitlichen. Die letzteren werden in der Regel in der Achsel eines Blattes (Stützblattes oder Deckblattes), und zwar genau in der Mediane desselben angelegt. Deswegen werden sie auch axillare oder Achselknospen genannt.

Die formelle Morphologie hat versucht alle diejenigen Fälle, in welchen die Knospen extraaxillär erscheinen, auf anfänglich axillare Anlegung derselben zurückzuführen. So sind in den Fällen der Konkauleszenz die Axillarknospen (die Axillartriebe) mit dem nächst jüngeren Internodium auf eine kürzere oder längere Strecke total verwachsen, nach oben verschoben und erscheinen erst hoch oberhalb des entsprechenden Tragblattes. Die Blüten der Cupheaarten sind ein ganzes Internodium oberhalb ihrer Deckblätter inseriert.

In den Fällen der Rekauleszenz verwachsen dagegen die Tragblätter mit den Axillarsprossen, so daß die Knospen, wie z. B. die Blütenstände der Linde auf der Oberseite der Tragblätter erscheinen. Sehr verschiedene Fälle der Rekauleszenz bietet die Familie der Solanaceen, wo die Tragblätter hoch an die Achse angewachsen sind. Wo die Blütenknospen aus der Blattlamina entspringen, reden wir von epiphyllen Blüten, manche derselben (Dulongia) verdanken ihre anomale Lage vielleicht der Rekauleszenz, in anderen Fällen, z. B. bei der Gabelgerste (Hordeum trifurcatum) scheint dieselbe ausgeschlossen, und dann haben wir es mit extraaxillären Knospen zu tun.

Bei dorsiventralen Sprossen sitzen die Seitenknospen häufig nicht in der Mediane der Tragblätter, sondern seitwärts nach oben. Manchmal läßt sich die Verschiebung derselben aus der Medianlage entwickelungsgeschichtlich verfolgen, in anderen Fällen sind sie von Anfang an extraaxillär angelegt.

Zu den interessantesten und am häufigsten besprochenen Fällen der extraaxillären Sprosse gehören die Ranken der zweizeilig beblätterten Vitisarten, die dem Blatt gegenüber tragblattlos erscheinen. In der Achsel des obersten Tragblattes entwickelt sich eine starke Knospe zum Verlängerungstrieb des Astes. Die formelle Morphologie betrachtet die Vitiszweige als Sympodien, ihre Ranken als apikale Enden der sympodialen Sprosse und eine solche Deutung ist phylogenetisch sehr naheliegend, leider liefert die Entwickelungsgeschichte keine Belege dafür, indem die Blattknospe schon in der ersten Anlage stärker als die Knospe der Ranke erscheint.

Entwickeln sich in der Achsel eines Tragblattes nebeneinander mehrere Knospen, so werden sie Beiknospen oder Beisprosse,

auch akzessorische Knospen genannt. Sind sie in einer transversalen Reihe in der Achsel gruppiert, dann haben wir mit kollateralen Beisprossen zu tun (die Blüten der Musa, die Brutzwiebel in den Achseln der Zwiebelschuppen bei Allium). Häufiger sind die Beisprosse serial, also in der Mediane übereinander hervorbrechend. Die größte und älteste Beiknospe steht bald unten (Lonicera) und die anderen folgen derselben in akropetaler Richtung, bald folgen die Beiknospen in basipetaler Aufeinanderfolge (Sambucus, Robinia, Pterocarya). Bei Gleditschia bildet die oberste und stärkste Beiknospe den langen Sproßdorn, während die tieferen Blattknospen sind.

Uneigentliche Beiknospen. Mit den Beisprossen darf man nicht jene Fälle verwechseln, wo in einer Blattachsel zahlreiche Sprosse emporwachsen, die jedoch aus den Achseln der dichten Niederblätter des gewöhnlichen Achselsprosses, als Sprosse höherer Ordnung emporwachsen. Klar wird der Sachverhalt durch die Lage der Vorblätter, der vermeintlichen Beisprosse, gemacht. Bei den Dicotyledonen stehen an allen serialen Beisprossen eines Tragblattes die Vorblätter zur Mediane des Tragblattes transversal. Bei den gedrängten polykladen Seitensprossen sind dagegen die Vorblätter transversal zur Lage der entsprechenden Niederblätter des primären Seitensprosses orientiert, also an benachbarten Sprossen verschieden zum Sproß I. Ordnung orientiert.

Blattstellung an der Achselknospe. Die ersten Blätter eines Seitenzweiges, die als Niederblätter ausgebildet und auch der Lage nach von den folgenden verschieden sind, werden Vorblätter genannt. Bei den Monokotyledonen ist typisch nur ein Vorblatt vorhanden, das auf der Rückseite des Seitensprosses, gegenüber dem Tragblatt adossiert ist. Das adossierte Vorblatt ist



Fig. 45. Campanula medium mit Deckblatt d und beiden Vorblättern des blütentragenden Seitensprosses v, v. Nach Karsten.

gewöhnlich zweikielig. Bei den Dikotyledonen sind typisch zwei Vorblätter vorhanden, welche transversal zur Medianebene des Seitensprosses inseriert sind (Fig. 45. Das tiefer inserierte, ältere wird als α-Vorblatt, das jüngere β-Vorblatt genannt.

Die Art und Weise wie die einzelnen Blätter der Knospe mit ihren Rändern sich berühren oder mit Teilen der Blattfläche gegenseitig decken, wird Knospendeckung (Aestivatio, Foliatio) genannt. Man unterscheidet:

1. Offene Knospendeckung, wenn die einzelnen Blätter im Zyklus sich mit den Rändern nicht erreichen. Der Verschluß wird doch erreicht, indem die Blätter der benachbarten Zyklen in Kontakt treten.

2. Klappige Knospendeckung, wenn die benachbarten Blätter sich mit den Rändern gegenseitig berühren. Der Verschluß kann erhöht werden durch die eintretenden Nahtverbindungen; entweder greifen die einzelnen Epidermzellen der benachbarten Blätter zahnförmig ineinander ein (Zellennaht) oder die Kutikula ist nicht glatt, sondern mit Rippen versehen und die Kutikularrippen greifen ineinander ein, eine Kutikularnaht bildend.

3. Geschindelte (oder dachige) Knospenbildung, wenn die Blätter mit den Rändern übereinander greifen, sich gegenseitig bedeckend. Daß ist die gewöhnlichste Form der Knospendeckung, eine Abart derselben stellt die gedrehte Knospe dar, bei der alle Blätter eines Zyklus sich der Reihe nach hälftig bedecken (Fig. 46). Je nachdem, ob die gedeckte Hälfte linke oder rechte ist, resultiert eine links- und rechtsgedrehte Knospendeckung.



Fig. 46. Populus nigra. Querschnitt durch die Laubknospe. Die Knospenschuppen K zeigen dachige Deckung, die Laubblätter l haben eingerollte Knospenlage, zu jedem Laubblatt gehören zwei Nebenblätter ss. Nach Strasburger.

4. Geschlossene Knospendeckung entsteht, wenn die Knospe von einer Calyptra vollständig umhüllt wird, die nicht aus

einzelnen Blättern gebildet wird, sondern eine einheitliche Mütze darstellt und bei der Entwickelung der Knospe zersprengt oder abgeworfen wird. Schöne Beispiele der geschlossenen Knospen liefern manche Blütenknospen, bei welchen die Mütze bald den Brakteen (Durio), dem Kelch (Spathodea) oder der Krone entspricht (Eucalyptus).

Die Blattspreiten der einzelnen, in der Knospe verborgenen Blätter zeigen ver-

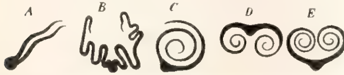


Fig. 47. Knospenlage. A einfach gefaltet, B mehrfach gefaltet, C zusammengerollt, D zurückgerollt, E eingerollt. Nach Warming.

schiedene Lage, die Knospenlage (Vernatio) genannt wird. Die Knospenlage ist:

flach (Morus, Viscum),

einfach gefaltet (Fig. 47A), also wie ein Bogen Papier zusammengelegt (Quercus, Prunus),

mehrfach gefaltet (Fig. 47B), längs der Seitennerven (Palmen, Fagus),

unregelmäßig zerknittert (Rheum, Kronblätter des Papaver),

zurückgerollt (Fig. 47C), die Blattränder gegen die Unterseite gerollt (Polygonum, Salix),

eingerollt (Fig. 47E), die Blattränder gegen die Oberseite gerollt (Pyrus, Malus, Nymphaea),

spiralig eingerollt, die Blätter in der Medianebene gegen die Basis eingerollt (Farne, Drosera).

Adventivknospen werden bei vielen Pflanzen auch außerhalb der Blattachsel und ohne Beziehung zu derselben an verschiedenen Organen angelegt (Fig. 48). Häufig sind sie an den Wurzeln in großer Menge endogen angelegt (Sonchus, Cirsium arvense, Prunus domestica, Rumex Acetosella) und helfen die Pflanze rasch vegetativ zu verbreiten, finden sich auf dem Hypokotyl (Euphorbia), an der Blattbasis (Tolmica Menziesii) oder an Blatträndern (Bryophyllum). An abgetrennten Organen (Blätter der Cardamine, Drosera, Begonia, Stengelstücke des Ribes, Salix, Wurzelstücke der Linaria, Taraxacum) regenerieren sie die Pflanze.



Fig. 48. Adventivknospen an Laubblattern, d und e an den Wedelsegmenten von Asplenium bulbiferum, f am Blattrande von Bryophyllum calycinum, c an Blattern von Cardamina uliginosa, a, b am Blattrande von Malaxis paladosa.

9. Lebensdauer der Pflanze und der einzelnen Sproßachsen. Einjährig (1) nennen wir die Pflanzen, welche im Verlaufe einer Vegetationsperiode keimen, wachsen, blühen, die Samen ausstreuen und absterben. Der ganze Lebenszyklus der einjährigen Pflanzen wird während der wenigen Monate des Frühlings und Sommers durchgemacht, im Herbst erhält sich bei denselben nur in den Samen latentes Leben. Keimen diese Samen schon im Herbst, wie unser Wintergetreide, um erst im nächsten Sommer zu fruktifizieren, und dann absterben, so haben wir überwinternde einjährige Pflanzen.

Zweijährig (2) sind die Pflanzen, die im ersten Jahre nur vegetative Blätter bilden und Reservestoffe sammeln, die im nächsten Jahre zur Bildung der Blüten und Samen verbraucht werden, wonach die Pflanze abstirbt. Die Reservestoffe werden bald in dicken, fleischigen Speicherwurzeln (Daucus, Beta), bald in Blättern (Kopfkohl) oder in Stengelknollen (Kohlrabi) abgelagert. Aehnlich den ein- und zweijährigen sterben nach der einmaligen Fruchtreife viele Pflanzen, die zur Blütenbildung eine längere Zeit brauchen, die sogar Dezennien nur vegetativ wachsen und Reservestoffe speichern, wie die Palme Corypha umbraculifera, die Bambuseen oder Agave americana. Alle Pflanzen, die nur einmal im Leben blühen und fruchten, ohne Rücksicht auf die Zahl ihrer Lebensjahre, werden monokarp oder hapaxanthisch genannt, polykarp oder perennierend sind dagegen die Arten, die wiederholt zur Blüte kommen. Die meisten Blütenpflanzen sind polykarp, so alle Bäume und Sträucher der gemäßigten Zone, die meisten Alpinen, die Kräuter, welche Rhizome oder Ausläufer bilden.

Bei den monokarpen Pflanzen stirbt der ganze Sproß mit der Fruchtreife ab, bei den polykarpen Pflanzen weisen verschiedene Sproßachsen, was ihre Lebensdauer anbelangt bedeutende Differenzen auf. Bei den perennen Kräutern sterben nach der Vegetationsperiode die oberirdischen Sprosse ab, während die unterirdischen und basalen Rhizome, Knollen oder Ausläufer als Ueberwinterungssprosse fortdauern. Bei vielen Wasserpflanzen (Utricularia, Cerathophyllum) sterbend agegen im Winter die basalen Sproßstücke ab, während ihre Vegetationsspitzen, von zahlreichen Blättern eng, zwiebelartig umschlossen, mit Schleim umhüllt als sogenannte Winterknospen (hibernacula) die Art überwintern.

Bei Holzpflanzen kommt es vor, daß die ein- oder mehrjährigen Aeste an der Basis sich den Laubblättern ähnlich mit Hilfe einer Trennungsschicht loslösen und abfallen. Die Erscheinung wird Absprung benannt und ist bei Eichen, Fichten, Castilloa elastica, sehr schön an einjährigen Kurztrieben der nordamerikanischen Sumpfcypresse (Taxodium distichum) zu beobachten.

10. Besonders angepaßte Sprosse. Die bunte Mannigfaltigkeit der Sproßformen der Pflanzen wird einerseits durch die Lebensdauer der einzelnen Sproßachsen, andererseits durch die Arbeitsteilung unter den verschiedenen Sproßachsen desselben Individuums, die an die klimatischen und edaphischen Verhältnisse der Umgebung sehr verschieden angepaßt sein können, bedingt.

Als ursprünglich und einfachst gebaut betrachten wir die Sprosse, deren Achsen als Stützen für die grünen Assimilationsblätter dienen, ohne sonst besondere Anpassungen zu zeigen. Solche Sproßformen zeigen einerseits einjährige Kräuter, wie Lein oder Hanf, aber auch die meisten Sträucher und Bäume (vgl. den Artikel „Baum" Bd. I S. 874). Die wichtigsten Abweichungen von solchen „typischen" Sproßformen lassen sich biologisch als Anpassungen begreifen wie folgende Beispiele zeigen.

1. Die Sprosse der Lianen sind besonders angepaßt, um möglichst schnell und mit kleinem Aufwand an Baumaterial die Laubblätter aus dem Schatten des Waldes an das Licht zu befördern.

2. Bei verschiedenen Xerophyten werden die Laubblätter in der Entwickelung der Oberfläche retardiert, verkümmern sogar gänzlich, die Sproßachsen übernehmen dagegen die sonst den Laubblättern eigene Rolle der Assimilationsorgane. So bei den Ruten- und junkoiden Sprossen, in noch stärkerem Grade bei den Stammsukkulenten und bei den Kladodien oder Phyllokladien besitzenden Arten.

3. Gegen ungünstige Einflüsse des Klimas während der Perioden der Trockenheit und der Kälte gerichtete Anpassungen der Sprosse beruhen in äußerst vielen Kombinationen auf der Bildung der unterirdisch bleibenden, geschützten, langlebigen, laubblattlosen Sproßachsen, aus welchen laubblatttragende Achsen von kurzer Lebensdauer an die Oberfläche emporgesandt werden. Es tritt da die starke Differenz der geophilen und der photophilen Achsen hervor, wie sie bei anderen, vorerwähnten Sprossen, die größtenteils oder ganz photophil sind, nicht vorhanden ist. Hier gehören ausdauernde Kräuter, die Wurzelstöcke (Rhizome), Zwiebeln oder Knollen besitzen.

4. Die letztgenannten Formen der Sprosse dienen der Pflanze zugleich als Speicher der Reservestoffe.

5. Dem Zwecke der Okkupierung möglichst ausgedehnter Bodenfläche dienen die wagerecht wachsenden Rhizome, und die

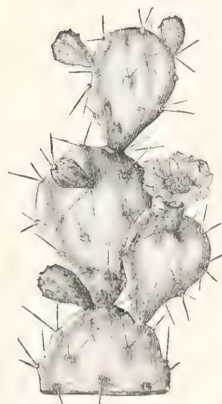
Ausläufer. Die meisten derselben, sowie die Brutknollen und Brutzwiebeln, sind der vegetativen Verbreitung dienlich.

6. Zu mechanischer Verteidigung angepaßte Kurztriebe sind als Dornen bekannt.

Assimilationssprosse. Die Achsen der oberirdischen photophilen Sprosse der krautartigen Pflanzen beteiligen sich neben den Laubblättern an der Assimilation; bei den ausdauernden Stengeln der Sträucher und Bäume, die mit Korkgewebe bedeckt sind, wird das Assimilationsgewebe nur wenig oder gar nicht gebildet und die Funktion der Assimilation übernehmen die grünen Blätter. Dagegen werden bei verschiedenen Pflanzen, die xerophytisch ausgebildet sind, die Laubblätter reduziert oder sogar als winzige, nicht grüne Schuppen ausgebildet, während die Assimilation durch die grünen Sproßachsen unterhalten wird. Assimilationsachsen finden wir in verschiedener Weise ausgebildet bei Stammsukkulenten, Kladodien und Phyllokladien bildenden Pflanzen, bei den Arten, die Ruten- oder junkoide Achsen besitzen.

Stammsukkulenten, d. h. Pflanzen mit grüner, dicker, fleischiger, wasserreicher Sproßachse, die mit reduzierten Blättern bedeckt ist, oder an welcher die Laubblätter ganz verkümmert sind, treten polyphyletisch in verschiedenen Familien der Angiospermen auf, nicht aber in älteren Gruppen des Pflanzenreiches. Die reichste Formentwickelung haben die Stammsukkulenten in der amerikanischen Familie der Kakteen erreicht, in Afrika sind analoge Stammesgestalten in der Gattung Euphorbia, verschiedenen Asclepiadaceen, Compositen, sogar Vitaceen zu finden. Die meisten dieser Pflanzen sind Bewohner heißer, trockener, sonniger, häufig steiniger Standorte, doch sind sukkulente Kakteen, speziell Arten der Gattungen Cereus, Rhipsalis, Pfeiffera auch als Epiphyten der tropischen Wälder bekannt.

Sowohl bei den Kakteen, wie bei den Wolfsmilcharten (Euphorbia) sind alle Uebergänge zwischen einer normalen, die Laubblätter tragenden und diesen als Stütze dienenden Sproßachse und sukkulenten blattlosen Achsen bei verwandten Arten aufzufinden. Die sukkulenten Achsen sind dick, kugelig, walzenförmig, häufig vielkantig (Fig. 49) (Stapelia, Echinocactus), manchmal in der Art einer Columna aufrecht stehend (Pilocereus), einfach oder gegen die Spitze kandelaberartig verzweigt (viele Cereusarten) und so eine blattlose Krone bildend, die bei mehreren Euphorbiaarten (Euphorbia heptagona, Euphorbia Ammak) weinglasartig nach oben erweitert ist. Das Spitzenwachstum der säulenförmigen Cereusarten dauert sehr viele Jahre an und erzeugt Stämme, die bei C. Pringlei bis 20 m hoch, bis 30 cm dick, bei dem ähnlichen Cereus giganteus sogar über 50 cm dick werden. Die Stammoberfläche ist gewöhnlich mit längs verlaufenden Rippen bedeckt, deren Kanten mehr oder weniger gebuchtet er-



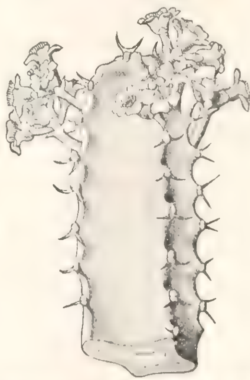


Fig. 49. Blattlose Sprosse der Sukkulenten. Links flache Sprosse der Opuntia monacantha, rechts vierkantige Stengel der Euphorbia resinifera. Nach Potonié.



Fig. 50. Trachymene (Umbelliferae). Assimilierende Flachsprosse. Nach Diels.

scheinen. Sind diese Einbuchtungen tief genug, dann werden die Rippen in Reihen von Warzen, die auf der Spitze Stacheln tragen, aufgelöst. Die Stachel, als mechanische Wehrmittel der wasserreichen Stammsukkulenten, sind bei den Kakteen sehr allgemein verbreitet, aber auch bei vielen sukkulenten Euphorbiaarten (Euphorbia grandicornis, Euphorbia grandidens usw.), sogar bei sukkulenten Asclepiadaceen (Duvallia, Decabelone). Die sonst stachellosen Euphorbiaarten werden im allgemeinen durch die giftigen Milchsäfte vor den Angriffen der wassersuchenden Tiere gut geschützt, manche stachellose Kakteen, z. B. die Ariocarpusarten sind infolge des Gehalts des Anhalonins als giftig bekannt. Die Stacheln der Kakteen haben verschiedene Form und Funktion. Bei den kletternden Peireskiaarten dienen sie als Klimmhaken, die mächtigen Stacheln der meisten Echinokaktusarten sind schreckliche Wehrmittel, die mit Wiederhaken versehenen Glochidien mancher Opuntiaarten sind den Kakteenzüchtern höchst unangenehm, die Angelhakenstacheln mancher Mammillariaarten haben den Erfolg, daß die Seitensprosse durch die vorbeistreifenden Tiere abgerissen und in die Ferne verschleppt werden.

Bei vielen Stammsukkulenten mit säulenförmigem Stamm erlöscht bald die Tätigkeit der Vegetationsspitze, dagegen tritt eine reiche Verzweigung an der Basis der Stämmchen ein, wie z. B. bei den Stapeliaarten, die dadurch dichte und weitausgedehnte Rasen bilden.

Die sukkulenten Sprosse ahmen vielfach Blattgestalten nach. So sind die Seitensprosse der Euphorbia xylophylloides dünn und flach, die Sproßglieder vieler Opuntiaarten kuchenartig verflacht, manche Rhipsalis- und Phyllocactusarten bandförmig flach. Bei den kugeligen Ariocarpusarten sind die Warzen dreiseitig, von oben verflacht und dicken Blättern ähnlich. Flach, bandförmig ausgebildete Sprosse werden Kladodien genannt; solche sind bei den Xerophyten verschiedener Verwandtschaft zu finden, z. B. bei den Polygonaceen (Mühlenbeckia platyclada), Loranthaceen (Viscum articulatum), Umbellifereen (Trachymene Fig. 50), Leguminoseen (Carmichetia, Bossiaca), seltener bei den Epiphyten wie bei Psilotum flaccidum. An den Rändern solcher Kladodien werden die Blätter nur als winzige Schuppen, bei manchen bei verminderter Transpiration (Mühlenbeckia, Carmichelia) auch als grüne Laubblätter entwickelt.

Kladodienartige grüne Sprosse von beschränktem Spitzenwachstum, also blattähnliche Kurztriebe werden Phyllokladien genannt, und sind den echten Blättern nicht nur der Gestalt nach, sondern auch anatomisch ähnlich, indem ihre Gefäßbündel in einer Ebene verlaufen und wie in den Blättern orientiert sind. Aehnlich den Blättern werden sie nach Verlauf einer gewissen Zeit von der nicht verflachten Hauptachse abgeworfen. Die Phyllokladien sind bei den Koniferen (Phyllocladus), Monokotyledonen (Asparageen), sowie Euphorbiaceen (Xylophylla) bekannt. Die Phyllokladien der Xylophylla, Phyllocladus, Semele androgyna tragen die Blüten am Rande in den Achseln kleiner Schuppenblätter, bei Ruscus (Fig. 51) erscheinen diese Blütensprosse an der Flachseite des Phyllokladiums, bei Danae racemosa sind die Phyllokladien blütenlos, die Blüten erscheinen als endständige Trauben an der Hauptachse. Bei Asparagus sind die Phyllokladien nadelförmig, zu Wikkeln angeordnet in den Achseln der schuppenförmigen oder hakenförmigen, rudimentären Blätter. Mit den xerophyten lederharten Phyllokladien nicht zu verwechseln sind die epiphylle Blüten oder vegetative Sprosse erzeugenden Blätter, die bei verschiedenen Pflanzen bekannt sind, so z. B. bei Hellringia ruscifolia, Dulongia acuminata, Hordeum trifurcatum.

bl
cl
f

Fig. 51. Ruscus aculeatus. f Blatt, cl Phyllocladium, bl Blüte. Nach Strasburger.

Rutensprosse besitzen lange, grüne, harte und dünne Internodien, spärliche oder winzige, manchmal sogar schuppenförmige Blätter; als Beispiele der Rutensprosse, die bei den Xerophyten sehr häufig auftreten, können wir die blattarmen Papilionaceen, wie Sarothamnus und Spartium, andererseits Pflanzen mit winzigen, wirtelig gestellten Blättern, wie Equisetum, Ephedra (Gnetaceae) oder Casuarina anführen.

Junkoide Sprosse sind häufig bei xerophytisch ausgebildeten monokotylen Sumpfpflanzen aus den Familien der Juncaceae, Cyperaceae, Restionaceae zu finden. Es sind lange und dünne, walzenförmig langsam sich verschmälernde, blattarme oder blattlose grüne Sprosse.

Speichersprosse. Rhizomknollen. An den unterirdischen Rhizomen werden, wie z. B. bei der Kartoffelpflanze (Fig. 54, 55), mehrere apikale Internodien knollenförmig verdickt, durch Korkgewebe geschützt und dienen der Pflanze als Speicherorgan, zugleich aber der vegetativen Vermehrung. Nach einer Ruheperiode treiben die ruhenden, durch winzige



Fig. 52. Crocus sativus. Blühende Pflanze mit der Basalknolle. Links der Griffel der Blüte. Nach Baillon.

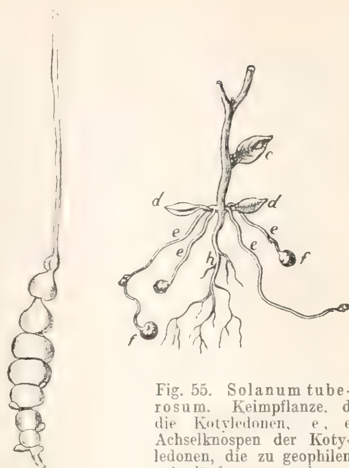


Fig. 53. Arrhenantherum bulbosum. Die kurzen, basalen Internodien sind zu Reserveknollen angeschwollen.

Fig. 55. Solanum tuberosum. Keimpflanze. d die Kotyledonen, e, e Achselknospen der Kotyledonen, die zu geophilen Ausläufern auswachsen und junge Knollen bilden, c das erste Laubblatt. Nach Schleiden.



Fig. 54. Unterer Teil der Kartoffelpflanze (Solanum tuberosum), die Mutterknolle ist dunkel gezeichnet, die jungen Knollen sind an dünnen Rhizomen gebildet, die Wurzeln sind fadenförmig Nach Strasburger.

Schuppenblätter an den Augen bedeckte, vertieft liegende Knospen der Knolle zu Sprossen. Aehnliche Rhizomknollen bildet Cyperus esculentus (Cyperaceae), Basella und Ullucus (Basellaceae), während mehrere Equisetumarten (Equisetaceae) Rhizomknollen bilden, die aus nur einem angeschwollenen, stärkeführenden Internodium bestehen. Als Basal-

knollen werden diejenigen bezeichnet, welche nicht an plagiotropen Rhizomen, sondern an der Basis des orthotropen Sprosses angelegt sind. Die Basalknollen sind bei vielen Monokotylen vorhanden (Crocus Fig. 52. Arum), speichern die Reservestoffe und verbleiben nach dem Vertrocknen der oberirdische Laubblätter tragenden Sproßachsen in der Ruheperiode. Bei den Wüstenpflanzen werden sie vielfach durch die vertrockneten Ueberreste der Scheidenblätter geschützt, die riesigen Basalknollen der südafrikanischen Testudinaria elephantipes (Dioscoraeaceae) werden durch mächtige und harte Panzerschuppen geschützt. Bei Arrhenatherum bulbosum (Graminaceae) erscheinen die Basalknollen nicht einzeln (Fig. 53), sondern mehrere (eine bis zehn), jede aus je einem kugelig angeschwollenen Internodium gebildet, perlschnurartig übereinander gereiht. Jede Teilknolle derselben treibt im Frühling aus der basalen Achsenknospe einen Laubsproß.

Bei den sympodialen Orchideen werden bei sehr vielen speziell tropischen und epiphytisch wachsenden Arten die freien Zweige des sympodial wachsenden und dünnen Rhizoms zu grünen Luftknollen umgewandelt, die als Wasserbehälter und zugleich als Speicherorgane der organischen Reservestoffe dienen. Homoblastisch nennen wir jene Orchideen, bei denen zahlreiche Internodien der freien Sympodialspitze zur Knolle angeschwollen sind (Cymbidium, Dendrobium, Cattleya), während diejenigen, bei welchen nur das basale Internodium der Seitenzweige knollenartig umgebildet wird, als heteroblastische bezeichnet werden (Coelogyne, Liparis). Während bei den erwähnten epiphytischen Orchideen die Luftknollen nur Reserveorgane derselben darstellen, sind zahlreiche Pflanzen vorhanden, bei welchen die Luftknollen der vegetativen Vermehrung dienen. Bei der hochrankenden Liane Vitis gongylodes (Vitaceae) schwellen die einzelnen bis 1 dm langen, vierkantigen Internodien bis zur zehnfachen Dicke (Fig. 56) an. Ihre Oberfläche wird im Gegensatz zu den benachbarten vegetativen Internodien mit Kork und Lenticellen bedeckt. Die schweren Knollen lösen sich, fallen ab und vermehren so die Pflanze. Bei Dioscoraea macroura, Dioscoraea Fargesii u. a. (Dioscoraeaceae) werden die Achselknospen der Laubblätter zu abfallenden braunen Vermehrungsknollen umgebildet, die bei der Dioscoraea bulbifera Faustgröße erreichen; bei unserer Ficaria ranunculoides (Ranunculaceae) sind die Brutknollen weizenkornartig und weiß; bei dem alpinen Polygonum viviparum (Polygonaceae) bilden sich winzige Vermehrungsknöllchen an Stelle der Blüten, bei der Aroidee Pinellia tuberifera werden sogar adventive Vermehrungsknöllchen auf dem Blattstiele gebildet.

Als Zwiebel (bulbus) werden Sprosse mit verkürzten Internodien, die von verdickten zu Speicherorganen umgewandelten Blattbasen umgeben sind, bezeichnet (Fig. 58, 59). Die verflachte Sproßachse wird dabei als Zwiebelkuchen, die verdickten Blattbasen als Zwiebelschuppen bezeichnet. Sind die Schuppen schmal und hoch, wie bei Lilium (Liliaceae), so sprechen wir von schuppigen, sind sie dagegen breitsitzend und mit den Rändern übereinander greifend, wie bei der Kuchenzwiebel, so sprechen wir von der schaligen Zwiebel. Nur selten wird die Zwiebel einblätterig (Allium ursinum, Allium fallax. Liliaceae), bei vielen Liliaceen und Amaryllidaceen beteiligen sich an der Zwiebelbildung sehr zahlreiche Blattbasen, wodurch wahre Riesenzwiebeln zustandekommen. Bei der südafrikanischen Brunsvigia Josephinae erreichen die Zwiebeln 60 cm Durchmesser. Im Gegensatz zu den Monokotylenzwiebeln haben die der Gesneriaceen längere Internodien und sind deswegen länglich. Vielfach werden in den Achseln der Zwiebelblätter serial kleine Vermehrungszwiebeln angelegt (Hyacinthus); der vegetativen Vermehrung dienliche, leicht abfallende Brutzwiebeln kommen auch an den Luftsprossen, z. B. in der Blattachsel (Fig. 57) der Dentaria bulbifera (Cruciferae), Lilium bulbiferum (Liliaceae) oder in den Infloreszenzen der Fourcroya oder Alliumarten vor. Interessanter scheint die rasch vorübergehende Zwiebelbildung bei der Keimung der großsamigen Palme Orania. Die Reservestoffe des Endosperms werden hier bei der Keimung in die verdickte Scheide des Keimblattes transportiert, die zwiebelartig die Vegetationsspitze des Keimlings umgibt, während die Haustorialspitze des Keimblattes mit der runden, schon entleerten Frucht abgeworfen wird.

Die Sprosse der Lianengewächse. Die zahlreichen Arten speziell der wärmeren Gegenden der Erde bilden orthotrope Sprosse, welche dünn und schwach ohne eine Stütze nicht aufrecht wachsen können. Solche ohne eine Stütze nicht erhebungsfähige Sprosse werden epikline genannt und die Pflanzen, die trotz ihrer epiklinen Sprosse mit Hilfe fremder Stützen befähigt sind, nach oben gegen das Licht zu wachsen, werden Lianen genannt (Bd. VI S. 176). Die Fähigkeit des Nachobenwachsens verdanken die Lianen, wie in dem oben erwähnten Artikel des näheren dargelegt ist, entweder ihren Wurzeln (Wurzelkletterer) oder den Blättern (Blattranker) oder den Sproßachsen (Windepflanzen, Sproßranker und zum Teil Spreizklimmerer). Es ist bei den Lianen eine



Fig. 56. Vitis pteropoda. Zwei Internodien der rankenden Stengel sind zu Reserveknollen angeschwollen und mit Lenticellen bedeckt.



Fig. 57. Zwiebeltragende Zahnwurz (Dentaria bulbifera) mit Brutknospen in den Blattachseln.



Fig. 59. Hyacinthus orientalis. Die Zwiebel im Längsschnitt. An der Spitze des Zwiebelkuchens erscheint der Blütenstand. Nach Baillon.



Fig. 58. Zwiebel der Tulpe (Tulipa) im Längsschnitt. zk Zwiebelkuchen, zs Zwiebelschuppen, k Anlage einer jungen Zwiebel, w Wurzel. Nach Strasburger.



Fig. 60. Parthenocissus Veitchii. R, R Sproßranken. Nach Strasburger.

sehr häufige Erscheinung, daß sie lange, aber leichte Suchersprosse bilden, die an einer vorhandenen Unterlage die Pflanze anheften. Solche Sucher treffen wir sogar bei den einfachst gebauten Lianen, also bei den Spreizklimmern vor. So sind es bei den Rotangpalmen (Calamus, Daemenorops) die gefiederten Blätter, deren Rachis in lange Flagellen ausläuft, die mit rückwärtsgekrümmten Stacheln bedeckt ist. Neben solchen Rachisflagellen bilden die Calamusarten in ihren Infloreszenzen ähnliche Achselflagellen, die an einer Stütze sich befestigend die Vegetationsspitze der Rotangpalme im Gewirr der Aeste des tropischen Waldes oben erhalten. Bei den Windepflanzen, wo die langen

Sucher kreisende Bewegungen ausführen, wird dieselbe auf zweifache Weise erleichtert. Einerseits (wie bei windenden Gnetumarten [Gnetaceae]) sind die windenden Langtriebe nur mit kleinen und leichten Schuppenblättern bedeckt, während die laubblättertragenden Kurztriebe erst nachträglich aus den Achseln jener Niederblätter sich entwickeln. Bei den anderen Windepflanzen, die keinen solchen Dimorphismus der Blätter zeigen, wird derselbe doch zeitweilig an den kreisenden Suchertrieben erreicht, indem deren Laubblätter statt der ganzen und großen Lamina nur kleine und leichte Vorläuferspitzen zuerst entwickeln, wie es die Dioscoraeaarten, Malphigiaceen, windende Asclepiadeen und Apocyneen tun. In beiden Fällen bleibt den Langtrieben der Windepflanzen das starke Vorauseilen des Wachstums der Internodien vor jenen der großen Laubblätter gemein. Bei den Rankerpflanzen läuft dagegen das Längenwachstum der tigmotropisch reizbaren Ranke dem Wachstum der Blätter voraus. Die reizbaren Ranken sind morphologisch metamorphosierte Blatt- oder Achsenteile. Was die letzteren anbetrifft, so werden zu den Ranken entweder besondere Kurztriebe (z. B. Bauhinia [Leguminosae]) oder einzelne Infloreszenzachseln (Cardiospermum [Sapindaceae]) oder endlich die Spitzen der Langtriebe umgewandelt. Der letzte Fall kommt bei den Apocynaceenlianen (Willoughbea und Landolphia), weniger deutlich bei Vitisarten (Vitaceae) vor (Fig. 60). Was die Gestalt der reizbaren Achsenranken anbelangt, so sind diese am häufigsten als verzweigte Fadenranken entwickelt (Vitis, Passiflora). Von Uhrfederranken sprechen wir dagegen, wenn ihre Spitze, bevor noch die Stütze erreicht wird, spiralig eingerollt wird (Bauhinia). Als Hakenkletterer werden die Lianen bezeichnet, die manche Kurztriebe zu gekrümmten und reizbaren Haken umbilden, welche nach dem Erreichen der Stütze sich verdickend dieselbe umfassen (Unona pl. sp., Ancistrocladus Fig. 61).

Bei vielen Lianenarten sind an älteren Exemplaren epikline lange und schwache Sprosse zu finden, die nach Art langer Ausläufer, ohne zunächst die Stütze zu erreichen, auf weite Entfernungen mit ihren langen Internodien auf der Bodenoberfläche wandern, um erst in bedeutender Entfernung von der Mutterpflanze an neuer Stütze zum Licht zu wachsen. Solche Kriecher finden sich sowohl bei Kletterpflanzen wie Smilax (Liliaceae), als bei Windepflanzen wie Polygonum cylinode, Thunbergia grandiflora (Acanthaceae) und Combretumarten (Combretaceae) vor, wo sie, ohne sich wie die Ausläufer zu bewurzeln, die Länge von 5 m erreichen.

Geophile Sprosse. Im Gegensatz zu den photophilen Sprossen, die oberhalb der Erde Laubblätter und Blüten tragen, wachsen die unterirdischen, geophilen Sprosseachsen oder Achsenteile, unter der Erde,

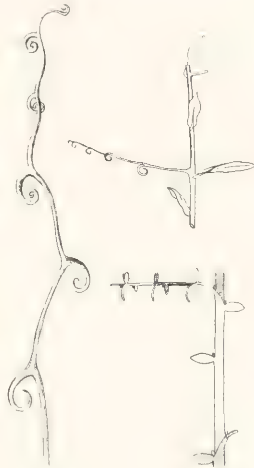


Fig. 61. Ancistrocladus Vahlii. Sympodial gebaute Sprosse des Hakenklimmers; die Kurztriebe zu reizbaren Haken umgebildet. Nach Treub und Massart.

ohne zu ergrünen, doch vor Frost und Trockenheit geschützt. In unendlicher Fülle sind die geophilen Sprosse in den Ländern mit wechselnden, trockenen und feuchten, kalten und warmen Jahreszeiten zu finden, sie fehlen aber auch den tropischen Ländern mit gleichmäßigem Klima nicht, wo die geophilen Sprosse der Verbreitung, der vegetativen Vermehrung, der Befestigung oder sogar der Ernährung der Pflanze dienen.

Unterirdisch leben z. B. die vegetativen Sproßteile der phanerogamen Wurzelparasiten, z. B. der Lathraea ode Orobanche, bei welchem nur die Blütenstände photophil sind, ebenso die chlorophyllosen Humusbewohner wie zahlreiche Orchideen oder Monotropa. Bei den wurzellosen Saprophyten unserer Nadelholzwälder z. B. Corallorhiza (Fig. 64) oder Epipogon übernehmen die geophilen, korallenartig verzweigten Sproßachsen die Funktionen der Wurzel, sorgen für Wasserbedarf und Erdsalze, befestigen die Pflanze. Dasselbe tun die Rhizome der wurzellosen Psilotumarten, die mit Wurzelhaaren bedeckt sind, die außerdem durch



Fig. 62. Ajuga reptans. Der blühende Sproß ist orthotrop, die Seitensprosse sind plagiotrop wachsende Ausläufer. Nach Goebel.

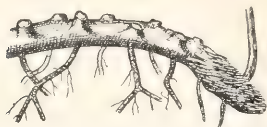


Fig. 63. Polypodium vulgare. Rhizom ist dorsiventral und trägt auf der Dorsalseite die Laubblätter in zwei Zeilen, auf der Bauchseite bildet sich die Wurzel. Nach Warming.

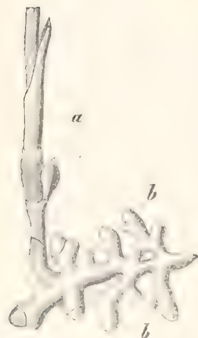


Fig. 64. Rhizom von Corallorhiza innata, wurzellos. Bei a Blütenstand, bei b Anlagen neuer Rhizomzweige. Nach Schacht.

Bildung der kleinen Bulbillen zur vegetativen Verbreitung der Pflanzen beitragen.

Die Geophilie der Sprosse gehört zu den uralten Erscheinungen des Pflanzenreiches. Im Paläozoikum waren die mächtigen Stigmarien geophile Sprosse der Lepidodendreen und Sigillariaarten, im Mesozoikum waren Farne mit geophilen Kriechsprossen (Rhizomopteris) sehr häufig, und auch heute sind die geophilen Sprosse bei den Pteridophyten sehr verbreitet, wie z. B. bei den Schachtelhalmen, Ophioglosseen, Gleicheniaceen, Schizeaceen, vielen Hymenophyllaceen, Polypodiaceen, Psitotaceen.

Pflanzen mit nur geophilen Sprossen sind nicht bekannt. Sogar die mächtigen Wurzelparasiten wie Rafflesiaarten oder Rhopalocnemis sind im Momente der Blütenbildung photophil. Bei den Pflanzen der gemäßigten Zone, der Savannen, Steppen oder Wüsten, wo die Geophilie sehr verbreitet ist, sind zwei Grenzfälle der Geophilie zu unterscheiden. Bei Nuphar oder Nymphaea, bei Paris, Agropyrum repens ist der Hauptsproß geophil und aus demselben wachsen die Blütensprosse — oder Laubblattsprosse photophil nach oben, oder es ist umgekehrt wie bei Solarnum tuberosum, Helianthus missourieusis oder vielen Epilobiumarten der Sproß ersten Ranges photophil, und erst die an der Basis desselben herauswachsenden Achselknospen werden zu unterirdischen, geophilen Sprossen. Eine Mittelstellung nehmen jene Fälle ein, wo der Hauptsproß zunächst photophil wächst, nachträglich jedoch bogig nach unten gesenkt in die Erde sich begräbt und die Pflanze bewurzelt, oder, neuen Individuen auf diese Weise Ursprung gebend, das gesellschaftliche Auftreten der Art verursacht, wie es verschiedene Brombeerarten, Nyssa, Cornus stolonifera, Mercurialis ovata, Thymus pl. sp., Lithospermum purpureo-coeruleum zeigen.

Die geophilen Sprosse der Stauden (so-

weit sie nicht als Zwiebel, Knollen oder lange Läufer ausgebildet werden) tragen den Namen Wurzelstöcke (Rhizome Fig. 65). Aeußerlich sind sie vielfach den gewöhnlichen oder

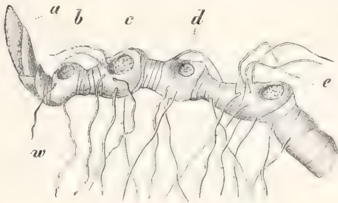


Fig. 65. Rhizom von Polygonatum multiflorum. a Knospe für den nächstjährigen oberirdischen Trieb, b Narbe des diesjährigen, c Narbe des vorjährigen. Nach Strasburger, Lehrbuch.

verdickten Wurzeln ähnlich, und es werden deswegen manche von ihnen in der pharmakognostischen Literatur falsch als „radices“ bezeichnet, doch tragen sie immer Blätter, entweder Laubblätter (Pteridium, Lygodium, Nuphar Fig. 63), oder Niederblätter, deren Narben auch an alten Rhizomen sichtbar sind.

Die Tiefe unterhalb der Bodenoberfläche, in welcher die Rhizome wachsen, ist einerseits von der Bodenbeschaffenheit, nämlich dessen Durchlässigkeit für Sauerstoff und Härte, andererseits von der Art der Pflanze abhängig. Die Rhizome der Sumpf- und Wiesenpflanzen, auch diejenigen der meisten Pflanzen der Alpenmatten liegen dicht unter der Erde, während bei den Pflanzen toniger Abhänge, der Steppen und Wälder die Rhizome vielfach erst im bedeutender Tiefe wuchern. So sind die bewurzelten Rhizome der Aristolochia Clematitis erst in der Tiefe von $^1/_2$ m anzutreffen, die Rhizome des Triticum regens, die im durchlässigen Bogen in der Tiefe von 20 bis 40 cm liegen, verlaufen an harten, betretenen Pfaden dicht unter der Oberfläche 1 bis 5 cm tief. Die richtige Tiefe wird einerseits durch die Tätigkeit der Zugwurzel, andererseits durch die tropischen Krümmungen der wachsenden Vegetationsspitze erreicht.

Die aufrecht wachsenden Wurzelstöcke haben sehr verkürzte Internodien auf dem orthotrop wachsenden Sproß. Bei unbegrenztem Spitzenwachstum wird eine grundständige Blattrosette gebildet und die Blütensprosse von begrenztem Wachstum und kurzer Lebensdauer wachsen aus den Blattachseln aus, wie z. B. bei Plantago media. Oder die Vegetationsspitze des Wurzelstockes wächst photophil nach oben, Laubblätter und Blüten bildend. Die photophilen aufrechten Sproßenden vertrocknen im Herbst und die Erneuerungssprosse (innovationes) werden aus den Achseln des geophil bleibenden unteren Sproßstückes gebildet. Die photophilen Sprosse des geophilen Wurzelstockes sind entweder annuell (monocyklisch), z. B. bei Hypericum perforatum, oder erzeugen im ersten Jahre eine grundständige Blattrosette und erst im zweiten Jahre blühen und vertrocknen sie (bei bizyklischen Laubsprossen, z. B. Chelidonium majus, Leontodon autumnalis), oder die Blütenstände erscheinen erst nach mehreren Vegetationsjahren, nach genügender Erstarkung des Rhizoms (Gentiana punctata, Gentiana purpurea, Gentiana lutea). Indem die Basalstücke der sekundären Achsen, die auf dem primären Wurzelstock sitzen, dabei erstarken und sich mehr oder weniger verlängern bezeichnet die alte Terminologie solche Pflanzen als mit vielköpfigen Wurzeln (radix multiceps) versehen. Die Erneuerungssprosse entspringen dabei entweder aus den Blattachseln der oberen Blätter (Armeria vulgaris) oder, was häufiger ist, aus der unteren (Primula, Polygala vulgaris).

Erzeugt die Spitze des Wurzelstocks zahlreiche dauerhafte und kurze, dichtgedrängte Erneuerungssprosse, so entstehen die charakteristischen Gestalten der Polsterpflanzen, die fürFelsen- und alpine Flora so bezeichnend sind. Bei den Polsterpflanzen der Gebirgspflanzen der Gegenden mit schneereichem Winter bleiben die winzigen Blattrosetten im Winter oberirdisch und grün (Saxifraga retusa, Cherleria sedoides, Androsace helvetica), während die Blattrosetten der Pflanzen mit trockenem Winterklima gewöhnlich vertrocknen und die trockene Blattmasse die Vegetationsspitzen der vielköpfigen Wurzel im Winter beschützt (Alyssum saxatile, Schievereckia podolica).

Bei vielen Stauden der Steppen verbleiben die dauerhaften, photophilen Blütensprosse nach dem Vertrocknen im Herbst samentragend aufrecht auf der Pflanze, und schütteln während des Winters in langen Zeiträumen ihren Samen auf die glatte Schneefläche, die dann vom Winde weiter auf Schnee verbreitet werden. Bei Eryngium campestre wird die Basis des sehr dauerhaften kugeligen Blütenstandes im Herbst sehr fragil, und die Winterwinde treiben diese mit Früchten beladenen kugeligen Ballen auf große Entfernungen wirbelnd herum.

Die aufrechten, geophilen Sprosse mit aufrecht oder schief aufsteigenden Innovationssprossen sind nicht befähigt zur raschen, vegetativen Verbreitung. Zwar nach dem Verfaulen des Muttertriebes be-

wurzeln sich bei manchen derselben die lebend bleibenden Tochtertriebe (z. B. Aconitum Napellus), doch okkupieren dieselben nur die nächste Umgebung der Mutterpflanze.

Anders bei den geophilen Rhizomen die wagerecht, plagiotrop im Boden wachsen und so die sekundäre Vegetationsspitze von der Mutterpflanze entfernen. Mit Hilfe der adventiven Wurzel sorgen diese für eigene Nahrung und werden nach dem Verfaulen der basalen Teile zu selbständigen Individuen. Solche Wachstumsweise befähigt zum geselligen Wachstum, die Gräser mit wagerechten Rhizomen helfen in erster Linie zur Bildung der geschlossenen Grasnarbe auf unseren Wiesen, zur Bindung großer Oberflächen der sonst labilen Sandflächen. Die Hauptwurzel solcher dikotylen Arten stirbt bald ab, ihre Rolle wird durch die adventiven Wurzeln vertreten, die schief aufsteigenden Rhizome erscheinen dadurch (Scabiosa) wie abgebissen (radix praemorsus der Terminologie). Die Niederblätter der unterirdischen Rhizome sind manchmal kurz aber fleischig und dick, wodurch dieselben wie gezähnt erscheinen (Oxalis, Acetosella) was in der Terminologie radix dentatus genannt wird, und Anlaß zur Bildung des Gattungsnamen Dentaria gegeben hat.

Die plagiotropen Seitensprosse, die auf der Oberfläche des Bodens fortwachsen, werden Ausläufer (oder einfach Läufer = Stolonen) genannt. Ajuga reptans (Fig. 62) oder die Erdbeeren liefern gute Beispiele der Stolonen, die an der Spitze sich bewurzeln und neuen Tochterindividuen vegetativen Ursprung geben.

Als Schutzsprosse hat man die zu Dornen umgebildeten Achsen bezeichnet (Fig. 66). Von den Stacheln oder Blattdornen sind die Sproßdorne durch die Spuren der abgefallenen, wenn auch häufig zu Schuppen reduzierten Blätter zu unterscheiden. Immer stechend und hart, sind sie entweder unverzweigt, wie bei Prunus spinosa (Rosaceae) oder Rhamnus cathartica (Rhamnaceae), oder verästelt, wie bei Gleditschia (Leguminosae), deren Stamm mit zahlreichen bis 2 dm langen Dornen bedeckt ist.

Reduzierte Sprosse. Unter den schwimmenden Wasserpflanzen besitzen die



Fig. 66. Links Zilla spinosa (Cruciferae), rechts Alhagi maurorum (Papilionaceae). Die Kurztriebe sind als Dornen ausgebildet. Nach Potonié.

Lemnaceen am meisten reduzierte Sprosse. Diese sind als linsenförmige, kleine Glieder ausgebildet, die in einer oder zwei Taschen Tochtersprosse abgliedern. Eine weitere vegetative Ausgliederung der Sprosse fehlt, bei Wolfia ist sogar die Wurzel nicht vorhanden. Bei den chlorophyllosen, parasitischen Rafflesiaceen ist der vegetative Körper zu mycelähnlichen Zellreihen oder Gewebemassen reduziert, die im Gewebe der Nährpflanze leben, und erst mit der Blütenbildung kommt der Sproß derselben nach außen. Bei manchen epiphytischen Orchideen (Fig. 67), bei welchen die flachen und grünen



Fig. 67. Taeniophyllum sp. Ein alter Keimling zwischen Moosen wachsend. Embryo ist zum Protokorm ausgewachsen, an welchem die flachen, assimilierenden Wurzeln eine beträchtliche Länge erreicht haben, während der Sproß reduziert bleibt.

Luftwurzeln assimilieren, während die Laubblätter zu Schuppen reduziert sind, wird auch die Sproßachse, wie z. B. bei Taeniophyllum zum Träger der Blüten reduziert.

Literatur. **K. Goebel,** *Organographie der Pflanzen. Jena 1898.* — **Derselbe,** *Vergleichende Entwickelungsgeschichte der Pflanzenorgane.* — **Derselbe,** *Einleitung in die experimentelle Morphologie der Pflanzen. Leipzig und Berlin 1908.* — **W. Hofmeister,** *Allgemeine Morphologie der Gewächse. Leipzig 1868.* — **F. Pax,** *Allgemeine Morphologie der Pflanzen. Stuttgart 1890.* — **K. Schumann,** *Praktikum für morphologische und systematische Botanik. Jena 1904.* — **K. Goebel,** *Pflanzenbiologische Schilderungen. Marburg 1891.* — **Warming-Johannsen,** *Lehrbuch der allgemeinen Botanik. Berlin 1909.* — **J. Velenovsky,** *Vergleichende Morphologie der Pflanzen. Prag 1907.* — **E. Dennert,** *Vergleichende Pflanzenmorphologie. Leipzig 1894.* — **S. Schwendener,** *Mechanische Theorie der Blattstellungen. Leipzig 1878.* — **A. W. Eichler,** *Blütendiagramme. 18*[illegible]. **Th. Irmisch,** *Zur Morphologie der Knollen- und Zwiebelgewächse. Berlin 1850.* — **H. Potonié,** *Grundlinien der Pflanzenmorphologie im Lichte der Paläontologie. Jena 1912.*

M. Raciborski.

Spruce
Richard.

Geboren 1817 zu Ganthorpe (Yorkshire). Er amtierte, dem Beruf seines Vaters folgend, kurze Zeit als Pfarrer, widmete sich aber bald der Botanik. Er bereiste zunächst die Pyrenäen und begab sich darauf nach Südamerika, wo er 1849 in Para landete. Dort begann er seine berühmte zwölfjährige botanische Durchforschung des tropischen Südamerika von Britisch-Guiana und Venezuela bis südlich nach Peru, welche auch wichtige geographische Ergebnisse hatte. Durch seine Vermittelung gelangte die britische Regierung in den Besitz von Saatmaterial vom Chinarindenbaum (Cinchona succirubra), das den Ausgang der Kulturen in Britisch-Indien darstellte. 1860 begab er sich infolge seiner durch das Tropenklima zerrütteten Gesundheit nach Guayaquil, von wo er nach wenigen Jahren gelähmt nach England zurückkehrte. Er starb in Coneysthorpe am 28. Dezember 1893. Von seinen großen Sammlungen bearbeitete er u. a. die Palmen und die Lebermoose aus dem Gebiete des Amazonenstromes und der Anden in mustergültiger Weise selbst.

W. Ruhland.

Stachelhäuter.

A. Allgemeines über den Tierkreis. 1. Definition des Kreises Echinoderma: a) Abgrenzung der Gruppe. b) Kurze Charakteristik. 2. Anatomie: a) Körperform und Symmetrie. b) Haut und Skelett. c) Ambulakralfurchen, Nervensystem und Neuralkanäle. d) Wassergefäßsystem. e) Steinkanal und axialer Organkomplex. f) Geschlechtsorgane. g) Leibeshöhle und Sinus. h) Darm. i) Blutlakunensystem. 3. Physiologisches: a) Bewegung. b) Nahrungsaufnahme. c) Atmung. d) Exkretion. e) Regeneration, Autotomie, Schizogonie. f) Parasiten. 4. Vorkommen und geographische Verbreitung. 5. Entwickelung: a) Furchung, Gastrulation. b) Larvenformen. c) Cölombildung, Trimerie. Beziehung zu Enteropneusten und Pterobranchiern. d) Ausbildung der Radiärsymmetrie. e) Weiterentwickelung einzelner Organe. 6. Phylogenie. B. Die einzelnen Klassen. I. Pelmatozoa. Crinoidea. II. Eleutherozoa. 1. Holothurioidea. a) Allgemeines. b) Systematik. 2. Echinoidea. a) Allgemeines. b) Systematik. 3. A[illegible]

a) Allgemeines. b) Systematik. 4. Ophiuroidea. a) Allgemeines. b) Systematik.

A. Allgemeines über den Tierkreis.

1. Definition des Kreises Echinoderma. 1a) Abgrenzung der Gruppe. Die Echinodermen sind festsitzende, kriechende oder grabende Meerestiere von sehr verschiedener Gestalt und Größe (wenige Millimeter bis über 1 m). Einige Vertreter, wie Seestern, Seeigel, Holothurie, sind allgemein bekannt und haben die verschiedensten Vulgärnamen erhalten. Dementsprechend beginnt auch die wissenschaftliche Betrachtung der Tiere sehr früh: schon Aristoteles hat verschiedene Seeigel genau beobachtet und beschrieben, einige allgemein übliche Namen (Echinus, Brissus, Spatangus, Echinometra u. a.) gehen auf ihn zurück. Linné hatte noch keine richtige Vorstellung von der Zusammengehörigkeit der heute mit dem Namen Echinoderma bezeichneten Tiere, sie stehen bei ihm in der großen Gruppe der Würmer. Lamarck und Cuvier (von denen letzterer die schon von Janus Plancus [Bianchi] betonte Zugehörigkeit der Holothurien mit den übrigen Echinodermen bewies), die beide früher eine Klasse Echinodermen aufgestellt hatten (1794 und 1795), vereinigten diese Tiere in ihren späteren definitiven Systemen mit anderen Formen, besonders mit Acalephen, zu dem größeren Stamm der Radiaten. Erst Leuckart begründete in definitiver Weise die Sonderstellung der Echinodermen als eines besonderen Kreises gegenüber anderen Radiaten, speziell den Coelenteraten, von denen sie sich schon durch die vom Darm völlig getrennte Leibeshöhle fundamental unterscheiden. Der Tierkreis der Echinodermen ist außerordentlich scharf abgegrenzt, bei gutem Erhaltungszustand eines Tieres läßt sich, soweit unsere heutige Erfahrung reicht, mit voller Sicherheit bestimmen, ob dasselbe ein Echinoderm ist oder nicht. Oberflächliche Aehnlichkeiten mit Hydroidpolypen (kleine Synapten) oder Quallen (Pelagothuria) kommen jedoch hier und da vor. Lange Zeit hindurch (z. B. Burmeister 1837, Leuckart 1848) hatte man Gephyreen mit den Holothurien zusammengeworfen (als Scytodermata), und noch Semper (1868) glaubte von den Synaptiden (Rhabdomolgus) durch die Sipunculiden die Brücke einer Verwandtschaft zu den Würmern schlagen zu können. Es handelte sich jedoch nur um oberflächliche Aehnlichkeit ähnlich lebender Tiere (grabender Schlammfresser), in Wahrheit ist auch an dieser Stelle die Grenze vollkommen scharf. Metschnikoff (1870) hat auf Grund der Aehnlichkeit der Larven (speziell der Auricularia und Tornaria) und des Vergleiches der Enteropneusteneichel mit einem Ambulakralfüßchen oder Tentakel die Echinodermen mit den Enteropneusten zu einer größeren Kategorie vereinigt, die auch heute noch von einigen Forschern beibehalten wird (Ambulacralia Hatschek 1888, Grobben). Es ist sehr wahrscheinlich, daß hier eine wirkliche, wenn auch entfernte Verwandtschaft vorliegt, die sich auch auf die Pterobranchier ausdehnt. Die Beziehungen zu den Brachiopoden, Chaetognathen (die Hatschek [1911] mit den Echinodermen und Enteropneusten als Dipleuridia vereinigt) und gar zu den Chordaten sind nur ganz allgemeiner Natur und auf das Verhalten von Leibeshöhle (Trimetamera Masterman, MacBoide) und Urmund gegründet (Enterocoelia Hatschek, Deuterostomia Grobben 1908).

Obwohl es möglich ist, den Echinodermenkreis sehr scharf abzugrenzen, umfaßt derselbe so verschiedene Formen, daß sich nur wenige ganz allgemeine Merkmale angeben lassen. Nicht nur das Vorhandensein von Stacheln, den der Name Echinoderma andeutet, sondern ebenso der für viele bekannteste Typen so charakteristische Besitz von Ambulakralfüßchen und wahrscheinlich sogar die fünfstrahlige Symmetrie (vgl. dagegen Jaeckel 1899 S. 10 bis 11) müssen aus einer allgemeinen Definition gestrichen werden. Als gemeinsamer alter (wenn auch gelegentlich sekundär eingeschränkter) Besitz aller Echinodermen lassen sich wahrscheinlich die in der folgenden kurzen Charakteristik zusammengestellten Merkmale betrachten:

1b) Kurze Charakteristik. Die Echinodermen sind Metazoen mit einer aus Ausstülpungen des Urdarms hervorgehenden Leibeshöhle (Enterocoelia), die bei der bilateral gebauten, mit Mund und (einem auf den Urmund zurückgehenden) After (Deuterostomia) versehenen Larve in 3 Paar Abschnitte zerfällt, von denen je 3 rechts und links vom Darm symmetrisch angeordnet sind. Die Hohlraumgruppe der rechten Seite wird stark eingeschränkt: die beiden vorderen rechten Paarlinge werden rudimentär und kommen oft ganz in Wegfall, der hintere rechte Cölomabschnitt wird oft kleiner als sein Gegenüber. Das „vordere Cölom" der linken Seite öffnet sich durch einen Porus nach außen (Porenkanal) und steht oder tritt mit dem mittleren linken Cölom, dem „Hydrocöl", durch den sogenannten „Steinkanal" in Verbindung. Das bei der Larve schwach hufeisenförmige und in Vorder-, (dicken) Mittel- und Enddarm zerfallende Verdauungsrohr nimmt beim ausgebildeten Tier eine spiralige Drehung im Sinne des Uhrzeigers (vom Mund aus gesehen) an, wobei das linke Enterocöl auf die der Mundseite, das rechte Cölom auf die dem Mund entgegengesetzte Seite gedrängt wird. Das vordere und hintere Enterocöl senden Kanäle, die Pseudohämalgefäße oder „Sinus", aus, die viele andere Organe begleiten. Zwischen den Cölomsäcken, dem äußeren Epithel und dem Darm wird die ursprüngliche, mit Mesenchymzellen und Grundsubstanz ausgefüllte Furchungs-Blastulahöhle zu dünnen Bindegewebslamellen eingeengt (Mesenterien usw.), in denen zahlreiche Wanderzellen, mehr oder weniger deutliche und regelmäßige schizocölische Blutlakunen sowie zahlreiche kleinere oder größere, maschig gebaute Kalkkörper angetroffen werden. Das ursprüngliche Skelett läßt sich in ein orales und ein apikales einteilen,

wovon jenes über dem linken, dieses über dem rechten hinteren Enterocöl seinen Ursprung nimmt.

Es besteht die Tendenz zur Ausbildung einer radiären, meist fünfstrahligen Symmetrie; sie äußert sich besonders in der ringförmigen Ausbildung von Hydrocoel- oder Wassergefäß-, Sinus- und Nervensystem und in davon abgehenden radiären Gefäßen bezw. Nerven, sowie in regelmäßiger Anordnung der Skelettstücke. Von den Hauptkanälen des Wassergefäßsystems pflegen einfache oder verzweigte blindgeschlossene Säckchen auszugehen und die Haut in etwa fingerförmigen beweglichen Fortsätzen vorzutreiben. Die selten zwitterigen Geschlechtsorgane stellen einfache (vom Cölom herstammende), mit dünnem Kanal nach außen mündende Säcke dar, die entweder auf den Interradius des Porenkanals beschränkt sein oder auch radiär symmetrisch werden können, wobei sie oft in den Interradien ihre Hauptausbildung erfahren.

2. **Anatomie.** Richtet man sein Hauptaugenmerk auf die lebenden fünfstrahligen Vertreter der Echinodermen, so lassen sich zu einer allgemeinen Charakteristik derselben noch ungefähr folgende mehr oder weniger allgemeingültige Züge hervorheben.

2a) Körperform und Symmetrie. Der Körper der Echinodermen läßt eine Oralseite und eine Apikalseite unterscheiden. Die erstere ist nach dem Mund benannt, der fast immer in ihrem Mittelpunkt liegt. Der After, der zuweilen fehlen kann (Ophiuriden und einige Asteriden), liegt zuweilen (Pelmatozoen) ebenfalls auf der Oralseite; bei den Eleutherozoen findet er sich auf der apikalen Körperhälfte, aber auch hier nicht im Zentrum, sondern meist etwas und oft erheblich weit davon verschoben. Bei den Pelmatozoen sitzt der Körper direkt oder auf einem Stiel mit der Apikalseite dem Boden auf, so daß die Oralseite nach oben sieht. Dagegen tragen die frei beweglichen „Eleutherozoen“ den Mund dem Boden zugewendet, oder sie kriechen mit einer Seite ihres in oroapikaler Richtung verlängerten Körpers auf dem Boden, wobei der Mund an die vordere Seite kommt (Holothurien).

Der Echinodermenkörper ist radiärsymmetrisch gebaut zu einer Achse, die die Mittelpunkte der Oralseite und der Apikalseite verbindet. Diese Symmetrie ist fast immer eine fünfstrahlige, so daß wir um die Achse fünf ungefähr gleiche Antimeren antreffen. Jedes Antimer ist für sich bilateral-symmetrisch gebaut, die fünf Symmetrieebenen derselben schneiden sich alle in der oroapikalen Achse des Tieres. Sie bezeichnen uns die Radien des Echinodermenkörpers. Diese Radien können mehr oder weniger vorspringen oder einen großen Fortsatz tragen, ersteres bei Asteriden und Ophiuriden, letzteres bei Crinoiden. In beiden Fällen redet man von „Armen“. Zwischen den Radien dehnen sich die Interradialzonen aus. Alle Organe, die von den radialen Symmetrieebenen durchschnitten werden oder ihnen seitlich sehr nahe liegen, werden als radial oder, bei stärker ausgeprägter seitlicher Lage, als adradial bezeichnet. Alles was dazwischen liegt, kann interradial genannt werden. Die Radiärsymmetrie ist jedoch niemals eine vollkommene, sie ist einer ursprünglichen Bilateralsymmetrie der Larve bezw. der Vorfahren aufgepfropft, vermag dieselbe aber nicht restlos zu verdrängen. Insbesondere ist der Porenkanal, also jenes Rohr, das etwas links von der dorsalen Mittellinie der Larve mündet und nach innen durch das vordere Enterocol und den Steinkanal in den erwähnten Hydrocölteil der Leibeshöhle führt, mitsamt dem ihn begleitenden axialen Organkomplex meist und ursprünglich immer nur in Einzahl vorhanden. Beim ausgebildeten Tier mündet er in einem Interradius der Oral- oder Apikalseite, den wir als den „poralen“ oder besser als den mittleren poralen Interradius (m. p. I.) bezeichnen wollen. Auch der After stört durch seine nicht zentrale Lage die radiäre Symmetrie. Er befindet sich bei den Pelmatozoen meist in dem Interradius des Steinkanals, kann die Asymmetrie aber noch dadurch vergrößern, daß er um einen (Asteroiden), anderthalb (reguläre Seeigel) oder zwei Interradienbreiten nach rechts verschoben ist. Man bezeichnet die Seite des Echinoderms als die rechte, die rechts liegt, wenn wir das Tier von der Oralseite ansehen und den Steinkanal auf uns zu bezw. nach unten halten. Außer den Resten der ursprünglichen Bilateralsymmetrie der Larve können sekundäre bilaterale Anordnungen im Echinodermenkörper mehr oder weniger deutlich werden. Diese sekundäre Bilateralsymmetrie kann sich nun häufig an die durch den After oder durch den Steinkanal gesetzte Störung der Radiärsymmetrie anlehnen; so finden wir bei Spatangiden einen ausgesprochen zweiseitigen Bau, dessen Symmetrieebene durch den After läuft. Bei Holothurien entsteht oft durch Ausbildung einer Kriechsohle eine Bilateralsymmetrie, deren Ebene den Steinkanal enthält und sich somit der primären Asymmetrie angliedert. Auch ganz asymmetrische Abweichungen kommen vor, können sich allerdings zuweilen zu sekundär symmetrischen Anordnungen ergänzen (Holothurien). Die Verschiedenheit der 5 Radien und 5 Interradien, die durch die genannten Störungen hereinkommt, nötigt zu einer eindeutigen Bezeichnung eines jeden Radius (R) und Interradius (I). Linke und rechte Teile lernten wir schon zu unterscheiden, ferner, daß wir je einen unpaaren oder mittleren Interradius und Radius haben, die sich gegenüberliegen. Unterscheiden wir nun noch an dem Tier eine den Porenkanal in ihrer Mitte enthaltende „porale“ und eine gegenüberliegende „antiporale“ Hälfte, so können wir, von der poralen Mitte ausgehend, die Interradien und Radien folgendermaßen bezeichnen: mittlerer poraler Interradius (m. p. I.), linker oder rechter poraler Radius (l. p. R. oder r. p. R.), linker oder rechter poraler Interradius (l. p. I. oder r. p. I.); dann folgen ein linker und ein rechter antiporaler Radius (l. a. R. oder r. a. R.), weiter ein linker und ein rechter antiporaler Interradius (l. a. I. oder r. a. I.) und endlich der mittlere antiporale Radius (m. a. R.). Die hier vorgeschlagenen Bezeichnungen poral und antiporal sind besser als die in demselben Sinne gebrauchten Ausdrücke „hinterer“ und „vorderer“ oder „ventraler“ und „dorsaler“ (Holothurien), von denen das erste Paar bei den Spatangiden,

das letzte bei den Crinoiden völlig widersinnig wird und Verwechslungen herbeiführt.

2b) Haut und Skelett. Unter der oft bewimperten, fast immer Drüsen- und Sinneszellen führenden Epidermis, die bei manchen Formen (z. B. vielen Ophiuriden) über großen Bezirken verloren gehen kann, folgt die dicke Cutis, deren mehr oder weniger feste

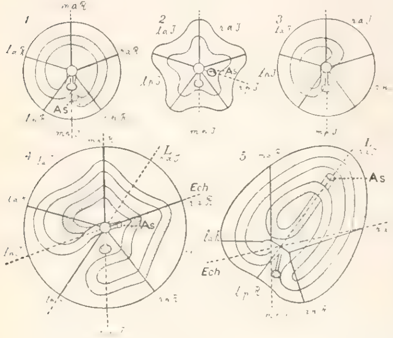


Fig. 1. Symmetrieverhältnisse, Darmverlauf und Lage von Mund, After (As) und Madreporit bei 1 Crinoiden, 2 Asteroiden, 3 Holothurioiden, 4 regulären Echinoiden, 5 Spatangiden. Man sieht auf die Oralfläche; alle Zeichnungen sind so orientiert, daß der Steinkanal dieselbe Richtung hat. l linker, r rechter, m mittlerer, p poraler, a antiporaler, R Radius I Interradius, also z. B. m p I mittlerer poraler Interradius. Ech Symmetrieebene durch den Mund und After bei regulären Echiniden. L Lovénsche Symmetrieebene der Seeigel.

Grundsubstanz von Bindegewebsfasern durchsetzt wird und auch zahlreiche Wanderzellen, zuweilen in besonderen Spalten angesammelt, enthält. Diese Cutis ist auch der Hauptbildungsherd des Skeletts, das sich allerdings in mehr oder weniger reicher Ausbildung auch auf die bindegewebigen Füllungen zwischen epithelialen Blättern an allen möglichen anderen Körperteilen ausdehnen kann. Alle Skeletteile entstehen als kleine Spicula intrazellulär, die Bildungszellen, die das weitere Wachstum bedingen, scheinen zuweilen außen anzusitzen, oft aber scheint die Auffassung berechtigt, daß auch die größeren Stücke eingeschlossen bleiben in einem Syncytium, dessen Kerne sich dem Wachstum des Skeletteils entsprechend vermehren. Das Syncytium wird von dem stets maschigen Skeletteil durchsetzt und pflegt außer seiner Grundsubstanz Fasern zu enthalten, die an den Grenzen zweier Skeletteile eine innige Verbindung herstellen können. Das Skelett besteht vorwiegend aus kohlensaurem Kalk, und jeder einheitliche Skeletteil verhält sich wie ein einheitlicher Kristall doppelbrechend, die optisch ausgezeichnete Achse hat in dem Maschenwerk eines Skelettstückes überall dieselbe Richtung. Das Wachstum vollzieht sich durch Appositionswachstum der einzelnen Stäbchen, durch Gabelung derselben (oft unter 120°), Zusammentreffen der Aeste usw. Das Maschenwerk hat meist eine ganz bestimmte Regelmäßigkeit; Balkenanordnung, Dicke und Verbindung sind streng geregelt.

Auch am Skelett läßt sich eine apikale und eine orale Hälfte unterscheiden. Beide richten sich in ihren Teilen nach der Radiärsymmetrie. So kommt es, daß man in fast allen Gruppen außer den Holothurien (deren Skelett schwach entwickelt ist und bei Pelagothuria völlig fehlt) auf der Apikalseite regelmäßige Kränze von interradialen und radialen Platten antrifft, von denen man die am frühesten gebildeten und konstantesten glaubte allgemein homologisieren zu können. So sollte das primäre Stück des apikalen Stiels der Crinoiden, das Dorsocentrale, einer zentralen Platte der Asteriden und Ophiuriden und weiter auch einer (wenig konstanten) apikalen Platte einiger Seeigel entsprechen, eine Homologisierung, die jedoch, wenn wir sie nicht auf Asteriden und Ophiuren beschränken, nicht von den Lagebeziehungen in der Ontogenese und ebensowenig von der vergleichenden Paläontologie bestätigt wird. Ein apikaler Kranz von 5 interradialen Basalstücken, den „Basalia" des Crinoidenkelches, sollte 5 primären, dem Centrale benachbarten Interradialplatten bei Asteriden und den die Genitalöffnung tragenden Genitalia der Echinoiden entsprechen, während nach einer anderen Ansicht diese Genitalia, wie auch die primären Interradialia der Asteriden den Mundschildern der Ophiuren und weiter den Oralplatten der Crinoiden korrespondieren sollen. Alle diese Platten zeigen nämlich das Gemeinsame, daß eine von ihnen mit dem Madreporus verbunden wird. Die erstere Annahme stützt ihre Zusammenstellung der gesamten Platten als „Basalia" darauf, daß dieselben bei der Larve über dem rechten hinteren Cölom angelegt werden, also demjenigen Leibeshöhlenteil, der, wie wir schon wissen, im ausgebildeten Echinoderm eine apikale Lage annimmt. Sie hat die Schwierigkeit, daß sie die Madreporenplatte der Ophiuriden für eine andere Bildung erklären muß als die der Asteriden und Echinoiden. Die zweite Auffassung muß die Mundschilder der Ophiuren mit den primären Interradialplatten der Asteriden statt mit den sehr ähnlichen Interoralplatten (Odontophoren) der Asteriden vergleichen. Vielleicht bestehen überhaupt keine echten Homologien zwischen diesen Platten bei so weit getrennten Klassen wie den Crinoiden, Echinoiden und Asteriden: es ist nicht unwahrscheinlich, daß sich diese Gruppen schon getrennt haben, als die Stammformen noch eine unregelmäßigere und mit zahlreichen Platten versehene Dorsalseite hatten. Es wird sogar angenommen, daß sich die einfache Anordnung eines basalen und eines radialen apikalen Plattenkreises bei Pelmatozoen mehrfach aus ursprünglich unregelmäßigeren Verhältnissen heraus entwickelt hat.

Auf den Kranz erster Interradialia folgen nach außen 5 radiale Platten, die sich bei Crinoiden zwischen die früheren interradialen Basalia und Oralia einschieben. Bei den Asteriden und Ophiuren finden wir in jedem Radius 2 primäre radiale Platten, von denen die periphere

früher entsteht und an das Ende der Radien rückt und deshalb Terminale genannt wird. Bei den Echinoiden haben wir nur einen Kranz von 5 radialen Platten außen von den Basalia, und diese (Ocellarplatten) müssen wahrscheinlich als Terminalia gedeutet werden. Während die inneren Radialia über dem rechten oder apikalen hinteren Cölom entstehen, sollen die Terminalia schon in der Cutis über dem linken oder oralen Cölom liegen und daher wie die Oralia eigentlich zum Oralskelett rechnen. Den Pelmatozoen fehlen eigentliche Terminalia.

Zwischen die genannten apikalen (Basalia, Radialia) und oralen (interradiale Oralia und radiäre Terminalia) schieben sich oft (Asteriden und Ophiuriden) eine große Zahl sekundärer und intermediärer Skeletteile ein. Besonders bei den mit Armen versehenen Formen dehnen sich später lange Plattenreihen bis zur Armspitze aus. Sie schieben sich immer hinter der Terminalplatte ein, wie überhaupt der Arm immer an der Spitze hinter den Terminalia wächst. Bei den Crinoiden, die der Terminalia entbehren, wird jeder Arm nur von einer Plattenreihe getragen, den Brachialia, die sich am Körper auf die Radialia stützen.

Die Radien der Oralseite zeigen ein besonderes Skelett, das genau genommen aus einer oder meist 2 adradialen Plattenreihen jederseits besteht. Man bezeichnet sie als ambulakrale Platten, die inneren Reihen auch wohl als Ambulacralia und die äußeren als Adambulacralia (Amb. bezw. Adamb.). Auch hier ist vorläufig eine Homologisierung nur bei so nahestehenden Klassen wie Asteriden und Ophiuriden gelungen. Im übrigen ist ihre Lage zu den Hydrocölfortsätzen der Radien eine sehr verschiedene: nach außen davon finden wir sie bei Echinoiden, nach innen bei Asteriden. Bei Crinoiden und den Pelmatozoen beschützen sie als Deck- oder Saumplättchen eine tiefe wimpernde Furche der Radien, die Nahrungsfurche, durch welche Nahrung dem Mund zugestrudelt wird.

Außer dem Hautpskelett kommt zuweilen noch ein mehr oberflächliches akzessorisches Skelett zur Ausbildung. Seine auffallendsten Bildungen sind die Stacheln, die besonders bei Echinoiden, Asteroiden und Ophiuroiden auftreten, und die vielleicht auf Stacheln zurückführbaren zangenartigen „Pedicellarien", die eine entsprechende Verbreitung haben. Die Stacheln können in den verschiedensten Formen auftreten und ihren speziellen Aufgaben aufs genaueste angepaßt sein.

2c) Ambulakralfurchen, Nervensystem und Neuralkanäle. Die eben genannten radialen Nahrungsfurchen werden auch Epineuralfurchen oder Ambulakralfurchen genannt. Ersteres deshalb, weil im Ektodermepithel der Furchen ein großer Nervenstamm läuft, der sich um den Mund herum mit seinen Nachbarn durch einen Nervenring in Verbindung setzt. Sie bilden zusammen das ektoneurale, orale oder epineurale Nervensystem, das bei den Eleutherozoen außerordentlich stark ausgebildet ist. Bei Holothurien, Echinoiden und Ophiuriden schließt sich jedoch die Furche über dem oralen Nervensystem, ungefähr wie die Rückenmarksrinne eines Wirbeltieres, zu einem Rohr, dem „Epineuralkanal", dessen Boden noch immer verdickt ist und den Nervenstamm darstellt. Der Prozeß der Einfaltung und Versenkung des Nervensystems ist allerdings stark modifiziert und nur selten rein zu beobachten.

Außer dem oralen, epineuralen Nervensystem besitzen die Echinodermen noch zwei weitere. Diese beiden anderen scheinen vom Enterocöl aus gebildet zu werden und zwar das eine von dem linken oder oralen, das andere von dem rechten und später apikalen Cölom, die beide ihre Fortsätze in die Arme entsenden. Das apikale Nervensystem entsteht an der apikalen Wand des Scheiben- und Armcöloms, es ist nicht mit typischem Nervenring versehen. Es fehlt den Holothurien, ist bei den übrigen Eleutherozoen sehr schwach und verschieden ausgebildet, bei den Crinoiden aber weitaus am stärksten entwickelt, weil es hier die Bewegung der hochorganisierten Arme dirigiert. Das zwischen oralem und apikalem Nervensystem gelegene sogenannte „tieferliegende" oder hyponeurale Nervensystem besitzt einen Nervenring (außer bei Holothurien) und davon ausgehend 5 Paare radialer Stränge (bei Holothurien einfach), die sich von innen den Epineuralbändern eng anlegen und, wie bemerkt, in der oralen Wand besonderer Abschnitte des oralen (linken Cöloms), nämlich des Ring- und radialen Sinus ihren Sitz haben. Dieses Nervensystem ist fast ausschließlich motorisch. Es fehlt den mit harter unbeweglicher Schale versehenen Echinoiden fast ganz und ist bei den Holothurien nur in seinen peripheren Teilen ausgebildet.

2d) Wassergefäßsystem. Zwischen den eben erwähnten „hyponeuralen" oralen Ring- und Radiärsinus und das große Cölom schiebt sich nun das Wassergefäßsystem ein, jener charakteristische Teil der Echinodermenorganisation, der die Derivate des linken mittleren Leibeshöhlenabschnittes der Larve, des Hydrocöls, umfaßt. Es bildet einen Wassergefäßring um den Oesophagus. Dieser Ringkanal ist außer bei Crinoiden mit einer (4—)5, oder mehr interradialen Reservoiren, den Polischen Blasen, besetzt. Immer (vgl. aber paractinopode Holothurien) entsendet er 5 radiäre Wassergefäße in die Radien (Radiärkanäle), die bei den meisten Eleutherozoen in einem von der Terminalplatte gestützten sensorischen Endtentakel blindgeschlossen aufhören. Seitlich geben sie alternierend oder paarig kleine Aeste ab, die in adradialer Stellung in der Epineuralfurche oder neben dem Epineuralkanal die Haut vorstülpen und immer der Atmung dienen. Auffallender noch als die respiratorische Funktion pflegt die sensorische und lokomotorische Tätigkeit zu sein, für die die Fortsätze differenziert sein können. Die vorwiegend sensorischen Fortsätze werden oft als Ambulakraltentakel oder Papillen, die lokomotorischen als Ambulakralfüßchen bezeichnet. Erstere besitzen einen hohen Ueberzug von sinneszellenreichem Epithel, letztere sind für die meisten Eleutherozoen charakteristisch und pflegen an einem Ende eine Saugscheibe zu tragen. Am inneren Ende besitzen sie (außer bei den auch saugscheibenlosen Füßchen der Ophiuren) ein besonderes Flüssigkeitsreservoir, die mit muskulöser Wand versehene Füßchenampulle. Das Füßchen wirkt in der Weise, daß zunächst die Ampullenmuskulatur sich kontrahiert und die Inhaltsflüssigkeit in den äußeren Teil

des Füßchens treibt, während ihr der Ausweg in den Radiärkanal durch eine besondere Klappe verwehrt werden kann. Das Füßchen wird also geschwellt, und sein Saugscheibenende kann sich dicht auf die Unterlage anpressen. Dann zieht die Längsmuskulatur des Füßchens an, die ziemlich in der Mitte der Füßchenendscheibe inseriert und diese Mitte zu heben sucht. Da indessen vom Rand der Saugscheibe kein Wasser unter diese Mitte eindringen kann, so bleibt das Füßchen vom Luft- und Wasserdruck fest angeheftet, und das Tier oder das gefaßte Objekt müssen dem Zuge folgen. Das Anheften kann noch durch Sekrete von Hautdrüsen befördert werden.

Die mit Füßchen dicht besetzten Teile der Radien werden als Ambulakren bezeichnet. Bei einigen Echinoiden und vielen Holothurien treten auch in den Interradien Füßchen auf, die jedoch immer mit einem Radiärkanal zusammenhängen. Die Ambulakren können entweder auf der Oralseite des Tieres bleiben oder sich bis nahe an den anderen Pol ausdehnen (Echinoiden, Holothurien). Bei den Echinoiden steht das damit in Zusammenhang, daß überhaupt die ganze Apikalseite und das darunter liegende rechte apikale Cölom bis auf eine kleine Zone eingeschränkt sind. Der Radiärkanal kann über (Seesterne, Ophiuriden) oder unter (Echinoiden) den ambulakralen Skelettplatten verlaufen und auch die Füßchen können zwischen (Asteriden) oder durch (Echinoiden) jene Platten nach außen treten. Die Ampullen liegen immer im Innern.

2e) Steinkanal und axialer Organkomplex. Im mittleren poralen Interradius geht aus dem Ringkanal der Steinkanal ab, er mündet aber nicht direkt nach außen, sondern führt erst in den sogenannten Axialsinus, der ungleich dem Steinkanal kein hohes bewimpertes Epithel besitzt, und aus diesem erst geht der Porenkanal nach außen. Die Mündung des Porenkanals ist oft in sehr viele Einzelporen zerfallen, die meist alle eine Madreporenplatte durchsetzen. Diese Madreporenplatte kann ein orale (viele Pelmatozoen und Ophiuriden) oder eine andere primäre interradiale Apikalplatte sein, oft (viele Seesterne) handelt es sich um eine selbständige Platte, die erst mit einer Primärplatte in Verbindung tritt. Bei Holothurien und vielen Ophiuriden fehlt ein besonderes Madreporit, zuweilen dehnen sich die Poren viel weiter als auf eine Platte aus (viele Echinoiden), und endlich können Steinkanal und Porenkanal in jedem Interradius oder unregelmäßiger und in sehr großer Zahl auftreten. Solche Vermehrungen, wie sie bei Asteroiden, Ophiuroiden, Holothurioiden und zumal bei Crinoiden häufig sind, stellen immer ein sekundäres Verhalten dar, ursprünglich ist immer ein primärer Stein- und Porenkanal vorhanden. Bei den meisten Holothurien verliert der Steinkanal seine äußere Oeffnung und mündet statt dessen durch ein Madreporenköpfchen, das vielleicht den Axialsinus repräsentiert, in die Leibeshöhle. — Bei den übrigen Gruppen zieht sich der Axialsinus am Steinkanal entlang in einen etwa wurstförmigen Raum aus, der gewöhnlich noch an der Steinkanalseite eingefaltet ist und in dieser Falte, bezw. ihrer bindegewebigen Ausfüllung, ein reiches Blutlakunensystem, das Axialorgan (Dorsalorgan, ovoide Drüse usw.) enthält, das fälschlich auch wohl als Herz bezeichnet worden ist. Es scheint teils Wanderzellen zu bilden, teils exkretbeladene Wanderzellen in sich aufzuspeichern. Den Holothurien fehlt das Axialorgan, bei Crinoiden bietet es ganz besondere Verhältnisse dar. Der Axialsinus stellt das linke vordere Enterocöl dar, für das Heider deshalb den Ausdruck „Axocöl“ in Vorschlag bringt. Bei Crinoiden löst sich das Axocöl, der sogenannte Parietalkanal, in die Leibeshöhle auf, vielleicht stellt aber der zentrale Stielkanal mit seinem eingeschlossenen Axialstrang einen Rest desselben dar. Am Mesenterium des Steinkanals, das wohl unterschieden werden muß von dem großen Darmmesenterium, welches ursprünglich das rechte und linke hintere Cölom trennte, finden sich noch eine Reihe von Bildungen. Zunächst der sogenannte Dorsalsack; er stellt ein Rudiment des rechten verkümmerten Hydrocöls dar und liegt, wo er überhaupt nicht völlig schwindet, unter der Endanschwellung des Steinkanals (der Ampulle), in die der Axialsinus mündet. Ferner bildet sich am apikalen Ende dieses Mesenteriums eine Einstülpung des linken (oralen) Cöloms, die sich abtrennt und von einer Zellwucherung des dortigen Cölomepithels sowie von einer ebendort entstehenden Lakune begleitet wird. Der Hohlraum stellt den Genitalsinus, die Wucherung die Anlage der Genitalorgane, den Genitalstolo, dar.

2f) Geschlechtsorgane. Bei Holothurien bleibt die durch Wucherung, Hohlraum- und Ausführungsgangbildung entstehende Gonade auf den Steinkanalinterradius beschränkt, bei den übrigen Eleutherozoen aber wuchert der Genitalstrang in enger Begleitung von entsprechenden Auswüchsen von Genitalsinus (Aboralsinus) und genitaler (aboraler) Lakune durch alle Interradien hindurch, um sich zu einem Kranz ganz oder fast ganz zu schließen. Von diesem Kranz aus bilden sich dann interradiale Anschwellungen mit Ausführungsgängen: die Gonaden. Bei den Crinoiden, deren primäre Gonade rückgebildet wird, finden wir einen von Lakune und Sinus begleiteten Genitalstrang in jedem Arm, in dessen Endästen die Geschlechtsprodukte reifen und durch Ruptur nach außen treten. Außer einigen Asteriden und besonders Holothurien sind die Echinodermen getrenntgeschlechtlich, doch ohne nennenswerte Geschlechtsunterschiede.

2g) Leibeshöhle und Sinus. Die Leibeshöhle ist meist geräumig und mit einem gewöhnlich wimpernden, ziemlich flachen Epithel ausgekleidet. An verschiedenen Stellen, in den Armen der Crinoiden und Ophiuroiden sowie in der allgemeinen Körperhöhle der paractinopoden Holothurien finden sich besonders stark wimpernde Stellen oder Wimperorgane. Das Leibeshöhlenepithel überzieht alle ins Innere des Cöloms vorspringenden Organe, den Axialkomplex, den Darm, die Geschlechtsorgane, Teile des Ambulakral- oder Wassergefäßsystems, z. B. die Polischen Blasen usw. Mesenteriale, bindegewebig-muskulöse Bänder mit epithelialem Ueberzug setzen die einzelnen Organe in Verbindung. Das primäre trennende Mesenterium zwischen dem linken (später oralen) und rechten (apikalen) Cölom wird gewöhnlich stark reduziert; sein ursprünglicher Verlauf wird uns aber durch die Lage des kreisförmigen Genitalstranges und der begleiten-

den Organe angegeben. Bei Holothurien ist das Mesenterium auf der ursprünglichen dorsalen Seite der Larve erhalten, es hat hier aber nicht horizontalen Verlauf, wie bei den übrigen Echinodermen, sondern zieht im ganzen genommen nur schräg nach links (hinten), überall den Windungen des Darmes folgend. Besondere Divertikel der Leibeshöhle, insbesondere der linken (aboralen) Hälfte stellen die Sinus dar, von denen der genitale Sinus vorhin, der orale oder hyponeurale weiter oben erwähnt wurden. Bei den Echinoiden, soweit sie Kiefer besitzen, ist der orale Ringsinus zu einem großen perignathischen Raum geworden, der im wesentlichen aus 5 großen interradialen, die Kieferpaare umschließenden Taschen besteht. Von diesen Taschen gehen einerseits 5 große „Stewartsche" Blasen in die Leibeshöhle sowie anderseits 10 adradiale, etwas verzweigte Ausstülpungen am Rand des weichen Peristomfeldes nach außen. Letztere stellen Kiemen dar, deren durchlüftetes Wasser aber durch besondere Pumpeinrichtungen und Vermittlung der Stewartschen Taschen auch zur Sauerstoffversorgung der ganzen Leibeshöhle dient. — Bei den Holothurien ist der Ringsinus zu einem großen Schlundsinus oder Peripharyngealraum geworden. Hier wie bei den Seeigeln wird der Wassergefäßring durch den großen Oralsinus an dessen apikales Ende verschoben.

Das Leibeshöhlenepithel bildet einen großen Teil der Muskulatur, so z. B. die kräftige Quermuskulatur und die großen radialen Längsmuskelstämme der Holothurien. Bei den meisten anderen Echinodermen ist die Körperwandmuskulatur wegen der geringen Beweglichkeit schwach oder sie fehlt völlig. Die Matrix für die Muskulatur des Wassergefäßsystems, z. B. die großen Längsmuskeln der Füßchen, Fühler und Radiärkanäle, stellt das eigene Innenepithel dar. Zuweilen kann sich auch hier noch eine Cölommuskulatur hinzugesellen. Endlich beteiligt sich auch das mesenchymatische Füllgewebe an der Bildung der Muskulatur, zumal an derjenigen der Skeletteile, die zuweilen eine Art Zwischenstufe zwischen Bindegewebe und Muskel beibehalten kann (kontraktile Faserzellen bei Crinoiden).

2h) Darm. Der Darm ist gewöhnlich rechts gewunden, was bei Crinoiden und Holothurien am besten zu sehen ist. Bei ersteren macht er eine ganze Windung oder mehr, so daß der After wieder in den mittleren poralen Interradius zu liegen kommt. Bei Holothurien wandert er von diesem Interradius ausgehend und am Primärmesenterium befestigt nur bis zum rechten antiporalen Interradius. Bei Echinoiden divergieren Anfangs- und Enddarm in ihrer Lage ungefähr um denselben Betrag, doch kommt hier eine schlingenförmige Verlängerung des Darmes mit Hin- und Rückgang hinzu. Die Ophiuriden entbehren des Afters, bei Asteriden scheint er nicht zur Entfernung unverdauter Teile zu dienen und kann oft fehlen. Bei Crinoiden finden wir ihn auf einem kürzeren oder längeren Rohr der Oralseite meist im mittleren poralen Interradius. Bei Echinoiden liegt er seitlich in einem meist mit kleinen Platten versehenen Periprokt der Apikalseite und kann von dort in dem rechten vorderen Interradius nach hinten wandern, bei Holothurien nimmt er das Hinterende des Körpers ein, von wo er nur selten etwas verschoben wird.

Bei den Asteriden und Ophiuren ist der Darm einfach sackförmig, trägt aber bei ersteren fünf Paar großer verzweigter, in die Arme gehender „radialer" Blindsäcke, zu denen noch weiter apikal gelegene unregelmäßigere Blinddärme hinzukommen. Ueber Atmungsanhänge des Darmes s. unten.

2i) Blutlakunensystem. Blutlakunen treten überall im Bindegewebe auf, wo es der Nahrungsmaterial-, Exkretstofftransport usw. erfordern. So z. B. in der Wand des Darmes und am Darm, wo wir bei Echinoiden und Holothurien eine große mesenteriale und antimesenteriale Lakune antreffen, die in die gleich zu erwähnende orale Lakune münden und bei Holothurien regelmäßige Kontraktionen aufweisen können. Die Asteriden weisen eine äquatoriale Ringlakune am Darm auf, die mit der Axiallakune kommuniziert; das Lakunensystem der Ophiuridendärme kommuniziert radial mit der aboralen Lakune. Der aborale Lakunenkranz mit seinen Aesten, die es zu den Gonaden entsendet, wurde schon oben besprochen. Auf der Oralseite schiebt sich das Lakunensystem zwischen Hyponeuralsinus und Wassergefäßsystem ein, indem es wie diese einen Ring und fünf davon ausgehende Radiärstämme aufweist, die je nach der Ausbildung des Sinus eine etwas verschiedene Lage annehmen können. Die orale Ringlakune pflegt mit der Axiallakune zu kommunizieren. Bei den Crinoiden steht ein oraler ringförmiger Plexus dagegen mit genitalen Armlakunen in Zusammenhang, während eigentliche Radiallakunen fehlen. Die Lakunen führen eine eiweißhaltige Flüssigkeit und wie das Wassergefäßsystem und Coelom verschiedenartige Wanderzellen. Kernlose, hämoglobinhaltige (?) Blutzellen sollen bei Ophiactis virens vorkommen.

3. **Physiologie.** 3a) Bewegungen. Die Füßchen sind nicht die einzigen Fortbewegungsorgane. Die Seeigel benutzen ihre ziemlich autonomen Stacheln (vgl. unter **B II 2** „Echinoidea"), die Ophiuriden schlangenförmige Bewegungen ihrer Arme; bei dieser letzten Gruppe sind die Füßchen saugscheiben- und ampullenlos und dienen hier vielfach in erster Linie sensorischen und respiratorischen Zwecken. Die Holothurien benutzen vielfach wurmartige Kontraktionen und Dilatationen ihrer Körperwand, die noch mit dafür besonders dienlichen Spicula versehen sein kann. Bei den Pelmatozoen entbehrt das ganze Ambulakralgefäßsystem überhaupt der lokomotorischen Funktion, die Tiere sind entweder festsitzend, oder sie schwimmen durch Zusammenschlagen ihrer oft reichlich verzweigten Arme. Pelagothuria, eine pelagische Holothurie, besitzt eine medusenschirmartig gebrauchte Schwimmscheibe und entbehrt der Füßchen (fast?) völlig. Auch andere Holothurien (einige Psychropotiden), einige Asteriden (Notomyota) und Ophiuroiden (Ophiopteron) können wahrscheinlich schwimmen.

Die Füßchen aller Radien arbeiten bei der Fortbewegung koordiniert, ein Zerschneiden des Ringnerven zwischen den Radien zieht eine Anarchie der Füßchenoperationen in den einzelnen Ambulakren nach sich. Seesterne und Ophiuren können sich mit Leichtigkeit umwenden, wenn man sie auf den Rücken legt, sie krümmen entweder einen Arm soweit herum, daß einige Füßchen richtig angreifen können und setzen

bei fortschreitender Wendung mit immer neuen nach, oder sie heben sich auf einigen Armen bis zum Umkippen (Formen ohne Saugscheiben). Ein getrennter Asteridenarm vermag noch längere Zeit zu leben (dasselbe gilt von Körperwandstücken mancher Holothurien), ziellos umherzukriechen und sogar Umkehrbewegungen auszuführen, dagegen ist ein isolierter Ophiuridenarm hilfloser und kann sich nur umwenden, wenn ein Scheibenteil erhalten ist. Die Asteriden scheinen negativ geotropisch und positiv heliotropisch zu sein. Der Endtentakel scheint (wie auch ein Teil der Ambulakralfurche) chemorezeptiv zu wirken. Mit einem geeigneten Brocken Nahrung kann man einen See- oder Schlangenstern nachlocken. Jennings konnte bei Seesternen experimentell Gewohnheiten erzeugen.

3b) Nahrungsaufnahme. Die Seesterne sind räuberische Tiere, die sich meist von Muscheln (z. B. Austern), Schnecken und Seeigeln nähren. Sie öffnen die Muscheln, indem sie mit zahlreichen proximalen Füßchen die nicht befestigte Schalenhälfte durch stetigen Zug heben oder die freien Ränder der auf die Schloßseite gelegten Muschel auseinanderziehen (Schiemenz). Zur Verdauung, nicht zur Lähmung des Opfers wird dann der ausstülpbare Magen in die Muschel geschoben oder über die Beute gestülpt. Die Ophiuriden können kleinere Objekte mit den Armen umschlingen und zu dem bewaffneten Mund führen, oder sie schieben mit den Buccalfüßchen kleine Tiere, Detritus und dergleichen zur Mundöffnung. Die Echinoiden grasen auf Felsen und meist hartem Boden die Algenkruste ab. Die meisten Holothurien sind Schlammfresser, nur die Dendrochiroten (und auch Pelagothuria und einige Synaptiden) treiben Planktonfang, indem sie ihre dann meist baumförmig verästelten Fühler ausstrecken und abwechselnd über den Mund streichen oder in den Mund stecken, wobei die zwei kleineren Fühler der Dendrochiroten durch abwechselndes Nachstreifen ein Entkommen der einmal eingesteckten Beute verhindern können. Die Pelmatozoen nähren sich dadurch, daß die Wimpern ihrer Nahrungsfurche einen Strom kleiner Partikelchen dem Mund zuführen.

3c) Atmung. Der Darm tritt häufig in den Dienst der Atmung. Bei den Holothurien scheint die Kloake regelmäßig Wasser ein- und auszupumpen, und bei der Mehrzahl derselben bildet sich eine dorsale Ausstülpung des Enddarmes, die sich in zwei reich verzweigte Stämme gabelt und die sogenannten Kiemenbäume oder Wasserlungen darstellt. Ihre Wimpern treiben das erneute Kloakenwasser bis in alle Aestchen. Bei Echinoiden findet sich ein sogenannter Nebendarm, d. h. eine abgeschlossene Längsfurche, die hinten und vorn mit dem Darm kommuniziert und auch zur Aufnahme von Atemwasser zu dienen scheint. Außerdem kommen bei Echinoiden die oben erwähnten Peristomkiemen hinzu. Bei Crinoiden scheint auch der als Analrohr vorragende und bei ausgestorbenen Formen vielfach mit Poren versehene Teil des Enddarms respiratorische Bedeutung zu haben. Die Asteriden besitzen fast immer dorsale fingerförmige oder verzweigte Ausstülpungen der Körperwand, die sogenannten Papulae, die sich auch auf Seitenteile von Arm und Scheibe ausdehnen können. Bei Ophiuriden sind besondere adradiale Einstülpungen der Körperhaut der Ventralseite, die sogenannten Bursae, auch in den Dienst der Atmung getreten. Dazu kommt bei allen Echinodermen die respiratorische Funktion der Füßchen und des ganzen Ambulakralsystems mit seiner äußeren Oeffnung, sowie die Hautatmung. Die verschiedenen Atmungsweisen können sich gegenseitig verdrängen. Bei Ophiactis sind die Bursae geschwunden, aber dafür lange respiratorische Polische Blasen ausgebildet. Bei den Elasipoden, Holothuriiden und Pelagothuria fehlen die Kiemenbäume, hier mündet aber der Steinkanal nach außen, oder die Tiere sind freischwimmend, sodaß reichliche Hydrocoel- bzw. Hautatmung stattfinden kann. Die Synaptiden endlich, die gleichfalls der Wasserlungen entbehren, haben einen ganz langgestreckten dünnwandigen Körper und zudem noch zuweilen abdominale Oeffnungen der Körperwand und können dadurch ihr Atembedürfnis befriedigen.

3d) Exkretion. Die Exkretion scheint fast allgemein durch Wanderzellen besorgt zu werden, die sich mit Exkreten in Form brauner Körper beladen und nun in der Haut (viele Holothurien) oder in den Bindegewebssträngen des Körpers (Crinoiden) oder im Axialorgan (Echinoiden und überhaupt Eleutherozoen ohne Holothurien) deponiert werden. Bei Holothurien scheinen Wanderzellen durch die Kiemenbäume, zeitweise durch die Gonade, und zuweilen auch durch Abdominalporen der Leibeshöhle nach außen gelangen zu können. Bei Asteriden treten Wanderzellen durch die Wand der Papulae nach außen oder es wird das mit Wanderzellen vollgepfropfte Ende der Papulae autotomisiert.

3e) Regeneration, Autotomie, Schizogonie. Die Regeneration scheint sich bei Echinoiden auf Stacheln, Pedicellarien usw., d. h. auf die äußeren Schalenanhänge zu beschränken. Die Crinoiden, Asteriden und Ophiuriden regenerieren mit Leichtigkeit Arme, die passiv oder durch Autotomie verloren gingen. Manche Asteriden können sogar von isolierten Armen aus die Scheibe regenerieren, wogegen im allgemeinen ein Teil der Scheibe für die Regeneration erhalten bleiben muß. Bei Asterien und Ophiuren (auch bei Holothurien?) trifft man Schizogonie, die Tiere zerreißen sich in der Mitte der Scheibe und ergänzen sich dann. Die Crinoiden können ihren eigentlichen Körper aus dem Korb des Apikalskeletts heraus (gelegentlich ohne merkbaren Grund), sowie Teile der Aome abwerfen und regenerieren. Die Holothurien können das verloren gegangene Hinterende (bei einigen Arten auch das Vorderende?) regenerieren. Einige Seewalzen reagieren auf starke Störungen durch Zerschnürung (Synapten) oder durch ein Auswerfen von Cuvierschen Organen, Kiemenbäumen (erst der freie rechte), vom Darm, ja sogar von dem Schlundsinus mit Wassergefäß- und Kalkring. Sie können alle diese Teile überraschend schnell ersetzen.

3f) Parasiten. Auf Crinoiden und Ophiuriden findet man parasitierende Myzostoma- und Stylinaarten, bei Schlangensternen können die Skelettplatten durch parasitäre Algen (Dactylococcus) resorbiert werden, sie beherbergen ferner Orthonectiden (bei Amphiura squamata), die Asteriden können große parasitäre Cirripedien, die Ascothoraciden, in ihrer Leibes-

höhle aufweisen; in der Leibeshöhle und dem Darm von Holothurien trifft man häufig Gregarinen und zuweilen parasitäre Schnecken (Entoconcha, Entocolax usw.). In der Kloake von großen Holothurien hausen kleine Fische (Fierasfer). Ektoparasitisch findet man auf Synapta eine eigentümliche Rädertierform, Discopus synaptae. Außerdem gibt es bei Echinodermen noch eine ganze Reihe von parasitären Würmern, Krebsen usw.

4. **Vorkommen und geographische Verbreitung.** Viele festsitzende Pelmatozoen scheinen in großen Gesellschaften oder Stöcken zusammen vorzukommen. Auch Seeigel trifft man zuweilen in Gesellschaften an, z. B. diejenigen, die zum Schutz gegen die Brandung Löcher in das Ufergestein bohren. Fast alle Echinodermen gehören dem Benthos, der bodenbewohnenden Lebewelt an, nur wenige können schwimmen, und äußerst selten sind pelagische Formen (Pelagothuria). Doch sind die Larven der meisten Stachelhäuter pelagische Tiere; abgekürzte Entwickelung und Brutpflege sind in polaren Gebieten, wo sie durch die niedere Temperatur und das den Salzgehalt heruntersetzende Schmelzwasser der Eisberge begünstigt werden, nicht selten; auffallend häufig ist Brutpflege in der Antarktis, in der die Arten durch das Heraustreiben pelagischer Larven in die an Küsten und Wohnplätzen arme tiefe See in ihrem Bestand mehr gefährdet als gefördert würden (Östergren). — Alle Echinodermen sind Meeresbewohner. Süßwasser hat eine z. B. bei Ophiuren äußerst starke Schädigung zur Folge. Jede der großen Gruppen ist über alle Meere verbreitet und kommt vom Flachwasser bis in die Tiefsee hinein vor. Auf die Verbreitung der einzelnen Gruppen, die Einwanderung ins Mittelmeer usw. kann hier nicht eingegangen werden.

5. **Entwickelung.** Trotz großer Verschiedenheiten im einzelnen weist die Entwickelung der Echinodermen in den wesentlichsten Punkten so viele Uebereinstimmung auf, daß ihre Schilderung am besten zu einer einheitlichen Darstellung verbunden wird.

5a) Furchung und Gastrulation. Die Befruchtung der Eier findet meist, wenn nicht Brutpflege (vgl. darüber die einzelnen Abschnitte) in Körperhöhlen vorliegt, frei im Seewasser statt. Zuweilen sind die reifen Eier mit einer Gallertschicht versehen, die an der früheren Anheftungsstelle im Follikel, die mit dem Ort der Richtungskörper zusammenfällt, eine Mikropyle aufweist, durch welche der Samenfaden eindringen kann. Künstliche Befruchtung ist im allgemeinen (zumal bei Seeigeln) leicht herbeizuführen, ebenso Bastardierungen oft recht entfernter Formen. Daher haben die Echinodermeneier eines der bevorzugtesten Objekte der experimentellen Forschung dargestellt. Je nachdem, ob pelagische, selbständiger Ernährung fähige Larven oder abgekürzte Entwickelung vorliegt, pflegen die Eier geringeren oder größeren Dottergehalt aufzuweisen. Einige Formen scheinen auch noch im Larvenzustand von dem Muttertier Nahrung zu bekommen (Amphiura squamata); bei Seesternen kommt gelegentlich Verwachsung mehrerer gleichaltriger Embryonen vor. Die Furchung ist fast immer eine totale und adäquale, bei Seeigeln folgt zwar auf 3 äquale Teilungen (2 meridionale und eine äquatoriale) am vegetativen Pol eine latitudinale Abgrenzung 4 auffallend kleiner Micromeren (die später das primäre Mesenchym bilden) von den „Macromeren", wogegen am animalen Pol eine meridionale Teilung 8 etwa gleiche „Mesomeren" ergibt, doch pflegt in der Blastula der Größenunterschied der Zellen vom animalen und vegetativen Pol ein ziemlich geringer zu sein. Eine polare Differenzierung ist oft schon recht früh, zuweilen an einer dem vegetativen Pole genäherten Zone von Pigment (Paracentrotus) und an der erwähnten Mikropyle zu erkennen.

Die hohle Blastula verläßt gewöhnlich die Eihülle und schwimmt mit ihrem Wimperkleid umher. Die Gastrulation vollzieht sich fast immer durch eine typische Invagination vom vegetativen Pol aus. Vom primitiven Ektoderm und Entoderm, besonders aber von dem Gipfel des Urdarmes aus, pflegt auf diesem Stadium — bei Formen, deren Larven ein Kalkskelett aufweisen, gewöhnlich schon früher — eine reichliche Abgliederung von Mesenchymzellen stattzufinden, die in die Füllsubstanz der Furchungshöhle einwandern und sich bald zu Bindegewebszellen, Wanderzellen und skelettbildenden Zellen differenzieren.

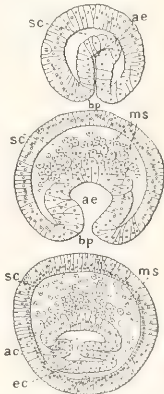


Fig. 2. Drei junge Entwickelungsstadien von Antedon. Urdarm (ae) und Mesenchymbildung (ms), bp Blastoporus, sc Furchungshöhle, ac Anlage von Mesenteron, Hydrocöl und vorderem Enterocöl, ec Anlage der hinteren Enterocöle. Nach Seeliger aus Bather.

Der obere Pol des Urdarms wendet sich bald nach einer Seite, um mit einer (selbständig) entgegenkommenden Vertiefung des Ektoderms den definitiven Mund zu bilden und dadurch die Ventralseite der Larve zu bestimmen. Bei den Crinoiden, von denen überhaupt nur die Larve von Antedon untersucht ist, bildet sich der Mund erst sehr spät, während ein Vestibulum für denselben schon viel früher zu erkennen ist. Die Eleutherozoenlarven bekommen alle sehr frühzeitig einen Mund, der bei Echinoiden und den meisten Asteriden (z. B. nicht bei Asterias glacialis und rubens) allerdings wieder geschlossen wird, um später einem definitiven Mund Platz zu machen. Beachten wir, daß immer ein präoraler Körperabschnitt vor dem Mund vorhanden ist.

Es ist bemerkenswert, daß bei den Echinodermen der definitive Mund niemals aus dem Urmund, dem Blastoporus, hervorgeht. Der

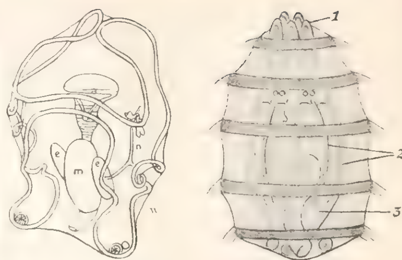


Fig. 3. Auricularia (links) und tönnchenförmige Larve (rechts) von Labidoplax digitata. a adorale Wimperschnur, m Mitteldarm, Magen, e hintere Enterocöle, n Nervensystem, h Hydrocöl, 1 Primärfühler, 2 Radiärnerven, 3 Enterocöl. Nach Semon aus Mortensen (links) und aus Lang (rechts).

Blastoporus schließt sich meist, bei den Holothurien geht er jedoch in den After des ausgebildeten Tieres über. Daraus folgt, daß die Echinodermen in die Gruppe der „deuterostomen" Cölomaten (Grobbens und Hatscheks) gehören.

5b) Die Larvenformen. Nach Durchbruch der Mundöffnung nehmen die Larven der Eleutherozoen auch äußerlich eine bestimmte Form an, es bildet sich mehr oder weniger deutlich der von Semon als „Dipleurula" bezeichnete Larventyp aus. Bei dieser Larve wird die Bewimperung auf ein kompliziertes geschlossenes Band beschränkt, das sich zwischen Mund und After um den Larvenkörper herumzieht. Hinter dem Mund wendet sich diese Wimperschnur jederseits ventral nach hinten, tritt dann jederseits auf den Rücken der Larve über, an dessen Seitenrändern sie nach vorn bis auf den präoralen Teil des Larvenkörpers läuft, um dort jederseits wieder zur Ventralseite zu biegen, eine kurze Strecke weit nach hinten zu verlaufen und sich vor dem Mund quer in Verbindung zu setzen und zu schließen.

Der ventral vor dem Mund gelegene Teil der Wimperschnur gliedert sich bei der Seesternlarve, der Bipinnaria, zu einer selbständigen, geschlossenen Wimperschnur ab, sonst bleibt bei allen Echinodermenlarven die eine Wimperschnur bestehen, die sich allerdings in ganz verschiedene Fortsätze auszieht und dadurch dem ganzen Körper eine verschiedene Gestalt verleiht. Bei allen Eleutherozoenlarven senkt sich das von der Wimperschnur umschlossene Feld gegenüber der übrigen Larvenoberfläche in die Tiefe, zumal in der Nähe des Mundes. Der Mund selbst pflegt auch noch mit einer v-förmig in den Anfangsdarm ausgezogenen „adoralen" Wimperschnur versehen zu sein.

Die Holothurienlarve oder Auricularia bleibt der Grundform der Dipleurula am nächsten, ihre Wimperschnur pflegt öhrchenförmig ausgezogen zu sein oder so komplizierte Windungen zu machen, daß man an die Kiemen eines Nudibranchiers erinnert wird (Auricularia nudibranchiata und plicata). Die Auricularien können Kugeln und Kalkrädchen als Skeletteile enthalten.

Die Seesternlarve oder Bipinnaria ist äußerlich auriculariaähnlich, aber durch ihre abgegliederte präorale Wimperschnur gekennzeichnet. Sie entbehrt eines Larvenskelettes, kann aber an ihrem (ziemlich ventralen) Vorderende einen terminalen und zwei seitliche muskulöse Fortsätze entwickeln, die Haftpapillen tragen, zur vorübergehenden Anheftung dienen und einen größeren bewimperten Haftnapf für definitive Festsetzung zwischen sich aufweisen. Asteridenlarven mit solchen Armen am Vorderende werden als Brachiolarien bezeichnet.

Die Ophiuriden und die Echinoidenlarve besitzen beide ein selbständig erworbenes Skelett, durch dessen einzelne lange, manchmal gitterförmigen Stäbe die Wimperschnur ebenfalls zum Wachstum angeregt und in lange Fortsätze

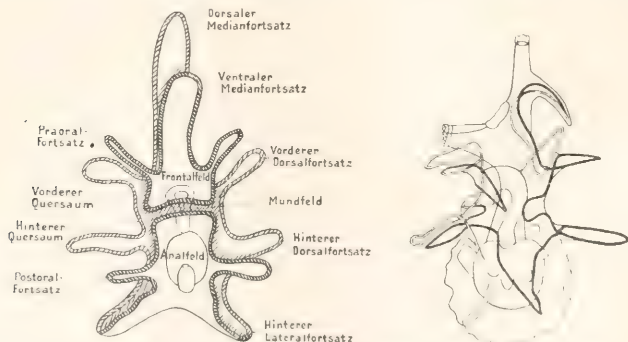


Fig. 4. Bipinnaria (links) und Brachiolaria (rechts), letztere von Asterias rubens. An der Brachiolaria sind die 3 Arme, die Haftscheibe, die 5 Hydrocöl- und 5 Enterocölausstülpungen zu sehen. Aus Mortensen, die linke Figur nach Johannes Müller.

ausgezogen wird. Beide Larvenformen bekommen dadurch ein etwas ähnliches Aussehen, was zu dem gemeinsamen Namen Pluteus Veranlassung gegeben hat. Da diese oberflächliche Aehnlichkeit aber nicht als Ausdruck echter Verwandtschaft angesehen werden kann, so redet man besser immer von Ophio- und Echinopluteus. Der Ophiopluteus besitzt ein Skelett aus zwei symmetrischen Teilen, von denen jeder Teil Aeste mit Körper- und Wimperschnurfortsätzen entsendet. Die stark entwickelten hinteren Lateralfortsätze sind nach vorn gerichtet. Der Echinopluteus weist dagegen ein komplizierteres Skelett auf, das im ausgebildeten Zustand aus mindestens 4 paarigen und einem unpaaren Teil besteht. Die hinteren (auch von der Wimperschnur überzogenen) Lateralfortsätze fehlen entweder oder sie sind direkt seitlich oder gar schräg nach hinten gerichtet. Auch kann ein unpaarer hinterer Fortsatz des Körpers ohne Wimperschnur vorhanden sein (Spatangiden). Vom hinteren Ende der Wimperschnur können sich 2 bis 3 Paar dicke Wimperepauletten abgliedern, die dann zu den Hauptbewegungsorganen werden, während die großen Fortsätze wie beim Ophiopluteus in erster Linie als Schwebeapparate dienen.

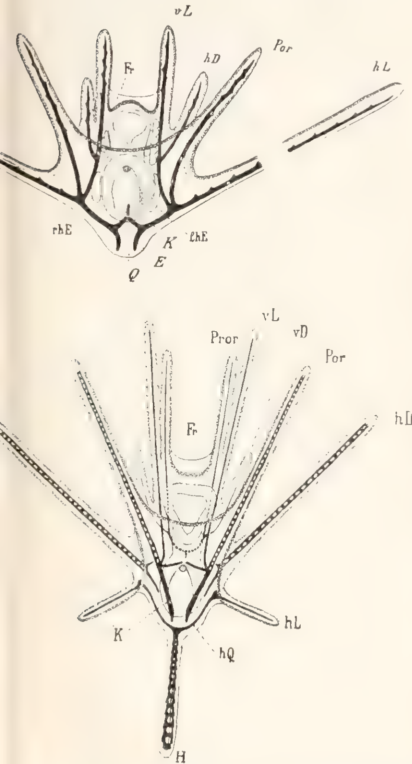


Fig. 5. Ophiopluteus (oben) und Echinopluteus (unten). Bei ersteren sind die 2 vorderen Enterocöle, die 2 Hydrocöle und das rechte und linke hintere Enterocoel (rh Eund lhE) eingezeichnet. Darm und Wimperschnur sind punktiert. Das Skelett schwarz eingezeichnet. Die Körperfortsätze werden wie die Skelettstücke bezeichnet. K Körperstab mit Endstab (E) und Querstab (Q), vL vorderer Lateralstab, hD hinterer Dorsalstab, Por Postoralstab, hL hinterer Lateralstab, hQ hinterer Querstab, H Hinterstab, Pror Präoralstab, vD vorderer Dorsalstab, beide am Dorsalbogen des Echinopluteus. Original mit Benutzung mehrerer älterer Figuren.

Die Art, in der man die Fortsätze der Eleutherozoenlarven vergleicht und einheitlich benennt, geht aus unseren Figuren 4 bis 5 hervor, aus denen auch die Nomenklatur der Stäbe am besten deutlich wird (Fig. 5). Die Dipleurula der Echinodermen ist mit anderen Larven, z. B. der Actinotrocha und besonders der Tornaria verglichen worden; bei der letzteren geht die Aehnlichkeit soweit, daß sie von J. Müller zuerst für eine Echinodermenlarve gehalten wurde. Das wichtigste unterscheidende Merkmal liegt in dem Vorhandensein einer besonderen perianalen Wimperschnur sowie in der terminalen Lage des Afters, der bei den Larven der Stachelhäuter ebenso wie der Mund auf die Ventralseite rückt, womit der ganze Darm etwas hufeisenförmig der Ventralseite zu gekrümmt wird. Der Scheitelplatte der Tornaria lassen sich jedoch verwandte Bildungen zur Seite stellen, so das verdickte, mit Nervenzellen und einem Wimperschopf versehene Präoralende von Antedon, ein am Ende des Präoralteiles gelegenes Ganglion alter Echinoplutei sowie die diffuse Bewimperung dieser Zone bei manchen jungen Holothurien- und Asteridenlarven (?).

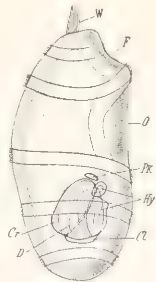


Fig. 6. Tonnenförmige Larve von Antedon. Das dem Apikalpol des fertigen Tieres entsprechende Ende ist nach oben gekehrt. W Wimperschopf, F Festheftungsgrube, O Ort der Vestibulareinstülpung, PK vorderes Enterocöl (Parietalkanal), Hy Hydrocöl, Cr und Cl rechtes und linkes hinteres Enterocöl. Nach Seeliger aus Claus-Grobben.

Uebrigens ist die Dipleurula nicht die einzige Larvenform der Echinodermen. Bei Antedon finden wir eine „tonnenförmige" Larve, die mit 5 Wimperreifen versehen ist. Die Synaptidenauricularia verwandelt sich später in eine tonnenförmige Larve, deren 5 äußere Wimperreifen (zu denen noch ein am Mund eingeschlossener kommt) durch Neuordnung der Stücke entstehen,

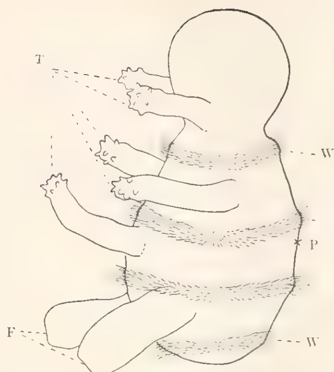


Fig. 7. Tonnenförmige Larve von Cucumaria planci. T die 5 Primärtentakel, F die ersten beiden Füßchen des maR, P Madreporus, W Wimperringe. Nach Selenka aus Grave.

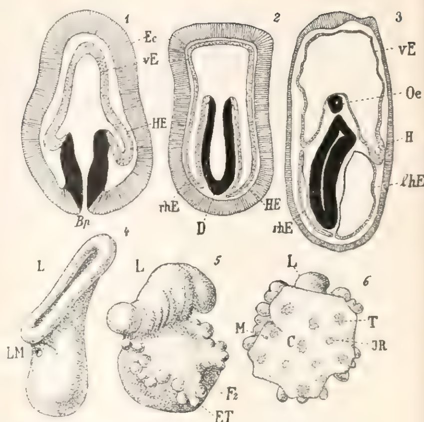


Fig. 8. Entwickelungsstadien von Asterina gibbosa. 1 bis 3 Längsschnitte, die die Bildung und Trennung von Darm und Enterocölen zeigen. Ec Ektoderm, Bp Blastoporus, D Darm (schwarz), Oe Oesophagus, vE vorderes Enterocöl, HE hinteres Enterocöl, rhE, lhE rechtes bezw. linkes hinteres Enterocöl, H Hydrocöl, 4 bis 6 Larven in toto von links vorn oder (6) rechts (apikal), L Larvalorgan, LM Larvenmund, Et Endtentakel, F_2 (II.) Füßchen, M Modreporit, C Centralplatte, IR primäre Interradialplatten, T Terminalia. Nach Ludwig (1, 2, 4, 5, 6) und Goto (3) neu gezeichnet.

in die die alte Wimperschnur zerfallen ist. Eine ähnliche tonnenförmige Larve kommt bei anderen Holothurien vor, auch bei Ophiuriden trifft man Larven (Ophiura brevispina), die mit 4 parallelen Wimperringen versehen sind, und selbst bei einem Seeigel (Mellita) konnten nach der Metamorphose einige Wimperkränze nachgewiesen werden. Ob diese tonnenförmige Larve oder „Doliolaria" früher weiter verbreitet war als jetzt, und ob ihre Wimperkränze homologisiert werden können oder gar eine primitive Anordnung darstellen (Grave), kann zurzeit nicht entschieden werden. Die Tonne von Antedon besitzt zwischen dem I. und II. Ring eine Anheftungsstelle, zwischen dem II. und III. die Vestibulumanlage.

5c) Cölombildung, Trimetamerie, Beziehungen zu Enteropneusten und Pterobranchiern. Kehren wir zur Dipleurula zurück, so ist über deren innere Organisation noch nachzutragen, daß der Darmbogen eine Dreiteilung in einen Oesophagus, einen dicken Magen und einen dünneren Enddarm erkennen läßt. Von besonderer Wichtigkeit sind die Cölomverhältnisse. Am Gipfel des Urdarmes bildet sich bei Echinoiden, Asteroiden und Ophiuroiden eine Ausstülpung, die sich sofort in eine rechte und eine linke zerteilt und vom Urdarm abschnürt. Man bezeichnet diese ersten Anlagen wohl als Hydroenterocole, weil sie sowohl das Wassergefäßsystem als auch die Leibeshöhle aus sich hervorgehen lassen. Die beiden Blasen teilen sich nun der Länge nach in zwei, von denen die linke vordere durch den primären Porenkanal sich mit der Außenwelt in Verbindung setzt. Die beiden vorderen Blasen können (Bipinnaria) wieder in Verbindung treten, sogar noch früher als die Abgliederung der hinteren stattgefunden hat. Das vorderste Blasenpaar jeder Seite teilt sich nun wiederum der Länge nach, bleibt aber links mit dem dadurch abgegliederten Teil durch einen dünnen Kanal, den Steinkanal, in Verbindung. Damit wären dann im ganzen drei Cölompaare vorhanden, von denen die vorderen jeder (wenigstens der linken) Seite durch einen Kanal in Verbindung stehen und weiterhin ganz vorn durch den Porenkanal nach außen münden. Es muß allerdings bemerkt werden, daß der Weg, der zu den drei Cölompaaren führt, auch ein etwas anderer sein kann: so scheint bei Ophiuriden das mittlere Paar zuweilen von dem hinteren aus gebildet zu werden und erst sekundär mit dem vordersten durch den Steinkanal in Verbindung zu treten. Ferner ist zu beachten, daß die beiden rechten vorderen Höhlen gewöhnlich erheblich kleiner sind als ihre linken Paarlinge und nicht durch einen Steinkanal in Konnex bleiben, auch ist gewöhnlich kein rechter Porenkanal vorhanden, obwohl er bei Asterina gibbosa gelegentlich auftreten kann und bei der Bipinnaria von Asterias als ganz vorübergehende Bildung beobachtet worden ist (Field). Bei Asteriden sind die beiden vordersten Cölome vereinigt und bilden die große Höhle des Kopflappens. Der mittlere rechte Teil soll sich nach Goto von dem hinteren rechten ausbilden, der überdies durch Auflösung seines Mesenteriums gegen das linke hintere Cölom und Neubildung desselben weiter rechts den

linken hinteren Abschnitt auf seine Kosten vergrößert.

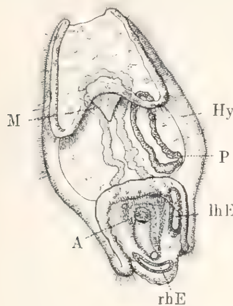


Fig. 9. Auricularia von Holothuria tubulosa. M Mund, A After, Hy Hydrocöl, P Madreporus, lhE, rhE linkes bezw. rechtes hinteres Enterocöl. Nach Selenka.

Am meisten abweichend verhalten sich die Holothurien. Hier bildet sich nur eine Hydroenterocölblase, die zudem vor jeder weiteren Teilung, ja bei Synapta sogar vor ihrer Abtrennung vom Urdarm schon durch einen (dann den Eindruck eines Oesophagus machenden) Porenkanal nach außen öffnet. Die eine Blase gliedert zunächst einen hinteren Teil ab, der sich in die Länge zieht, sich in der Mitte einschnürt und seine eine später abgetrennte Hälfte ventral- und hinten herum nach der rechten Seite hinüberschiebt. Damit wäre das hintere Paar von Cölomblasen an Ort und Stelle. Die bleibende vordere Blase teilt sich nicht mehr, doch bildet sich an dem Kanal, der sie mit der Außenwelt in Verbindung setzt, mehr oder weniger (Cucumaria) früh eine dünnhäutige Ausstülpung, die von Bury, Clark und Russo (gegen Ludwig) als der linke vordere Leibeshöhlenabschnitt gedeutet wird und später oft in die Madreporenblase überzugehen scheint. Rechts fehlen die beiden bei den anderen Eleutherozoen vorhandenen kleinen vorderen Paarlinge hier vollkommen. — Auch bei Antedon fehlen die beiden vorderen Paarlinge auf der rechten Seite. Im übrigen vollzieht sich hier die Bildung der Cölomsäcke so, daß zunächst eine Ausstülpung des Urdarms sich abschnürt, die bald Hantelform annimmt und von dem übrigen Darm, der inzwischen den After einbüßt, an seiner dünnen Stelle umfaßt und durch Verschluß dieses Bogens in zwei Hälften, das rechte und linke hinterste Cölom, getrennt wird. Der Darm selbst ist durch Verwachsung des Bogens sackförmig geworden, hat aber gleichzeitig eine neue Ausstülpung getrieben, die sich wieder in zwei gliedert und die beiden linken, durch den primären Steinkanal verbundenen Paarlinge darstellt, deren vorderster durch den primären Porenkanal nach außen mündet und sich als ein geräumiger „Parietalkanal“ in den Präoralfortsatz zu dem Scheitel der Larve hinzieht. Wir haben hier also ungleich den anderen Echinodermen zwei sukzessive Abschnürungen aus dem Urdarm zu unterscheiden.

Alle diese Verschiedenheiten sind jedoch wenig prinzipieller Natur, man kann sie alle darauf zurückführen, daß die eine oder die andere der Teilungen, die das Cölom zerlegen, früher oder später als andere stattfindet.

Die vordersten Paarlinge werden als linkes und rechtes vorderes Enterocöl, die mittleren als linkes und rechtes Hydrocöl, das rechte auch wohl als Ampulle oder Dorsalsack und die

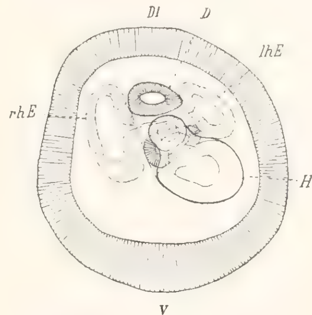


Fig. 10. Enterocölverhältnisse der Antedonlarve. Man sieht vom vorderen (apikalen) Pol auf Darm und Urdarmderivate. Dl dorsale, V ventrale Seite, D Darmbogen, die Enterocölblase mantelförmig einschnürend, rhE, lhE rechtes bezw. linkes hinteres Enterocöl. H Hydrocöl mit seiner apikalen Ausbuchtung, dem vorderen Enterocöl oder Parietalkanal, H und D gehen aus der Mesenterohydrocölblase hervor. Original mit Benutzung der Figur und Angaben von Bury u. a.

beiden hinteren endlich als linkes und rechtes hinteres Enterocöl bezeichnet. Heider nennt die vorderen Enterocöle Axocöle, die beiden hinteren „Somatocöle“.

Auch an diesem Punkte drängt sich wieder der Vergleich mit den Enteropneusten und ihren Verwandten, den Pterobranchiern, auf. Diese Tiere behalten zeitlebens drei hintereinander liegende Cölome, von denen nur das vorderste (Eichel- oder Mundschildcölom) unpaar ist (wenn das zugehörige rechte vordere Cölom nicht durch die Herzblase repräsentiert wird), präorale Lage aufweist, sich zum Scheitelpol hinzieht, und durch einen ursprünglich links gelegenen Porenkanal nach außen mündet. Das Hydrocöl entspricht nicht dem Eichelcölom, wie man früher, vor einer klaren Unterscheidung von Poren und Steinkanal und ihrer Beziehungen zum vorderen Enterocöl annahm, sondern dem linken Kragen- oder Halscölom (mit seinen Armen bei Pterobranchiern), dessen Halsporen jedoch nicht dem Seitenkanal homologisiert werden dürfen. Der Vergleich hinkt im wesentlichen nur darin, daß die Enteropneusten und Pterobranchier zwar einen Porenkanal, aber keinen Steinkanal besitzen, so daß ihre Hydrocölen entsprechenden mittleren Cölome statt durch die oder das vordere Cölom direkt mit der Außenwelt durch die Kragenpforten kommunizieren. Im einzelnen ist der Unterschied in der

Anlage der drei Cölomsegmente bei den Enteropneusten unter sich fast größer als im Vergleich zu den Echinodermen.

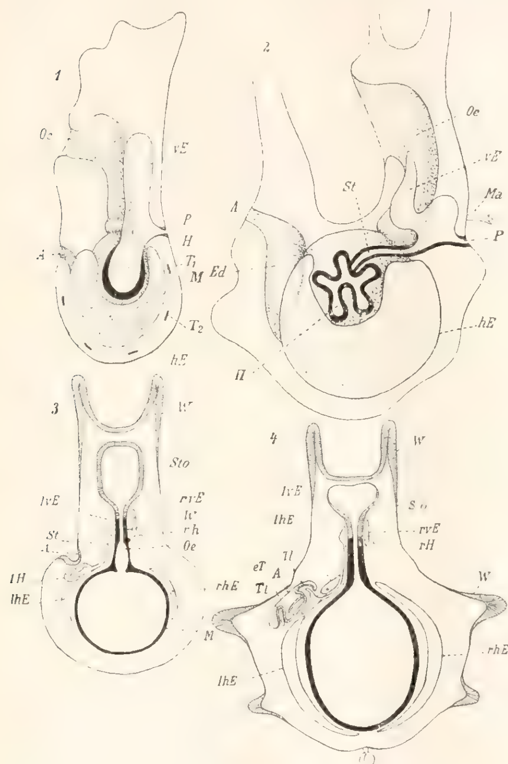


Fig. 11. Entwickelungsstadien von Echiniden. 1 (von Echinus microtuberculatus) und 2 in toto von links, 3 und 4 von Echinus esculentus (18 bezw. 23 Tage alt) im Frontalschnitt. Oe Oesophagus, M Magen, A After, Sto Stomodäum, W Wimperband, l bezw. r vE linkes bezw. rechtes vorderes Enterocöl, P Porenkanal, Ma Ort der Madreporenplatte (mit Pedicellarie?), St Steinkanal, l und rH linkes und rechtes Hydrocöl, A Amnioneinsenkung bezw. Höhle, Tl Endtentakel, eF Epineuralfalte, T_1, T_2 usw. Terminalia, 1 und 2 nach Bury, 3 und 4 nach Mc Bride. Neu gezeichnet.



Fig. 12. Brachiolaria von Asterias pallida. Darmkanal und Wimperschnüre sind punktiert, die Konturen des linken Hydroenterocöls dick ausgezogen, Br Arme, W Wimperschnur, vE vorderes Enterocöl, P Porenkanal, H Hydrocöl, lhE linkes hinteres Enterocöl. Nach Goto neu gezeichnet.

5d) Ausbildung der Radiärsymmetrie. Während aber die Enteropneusten im wesentlichen bilateralsymmetrische Tiere geblieben sind, verwandelt sich die trimere bilaterale Dipleurulalarve in ein radiärsymmetrisches Echinoderm. Dieser Uebergang zur Radiärsymmetrie ist wahrscheinlich die Folge einer festsitzenden Lebensweise ewesen, die ja oft Asymmetrie oder Radiärsymmetrie begünstigt. Da im groben genommen die linken Cölomteile nach der Metamorphose nach oben kommen, die rechten aber nach unten, so hat man zu der Annahme einer Festsetzung des Echinoderms mit der rechten Körperseite gegriffen, die weiterhin die Rudimentation der vorderen rechten Cölompaarlinge begreiflich erscheinen lassen würde. Doch entbehrt diese Hypothese anderer konkreter Beweise, wie denn überhaupt ein bahnbrechender Erforscher der Echinodermenentwickelung, nämlich Bury, dafür hielt daß die Radiärsymmetrie unabhängig von festsitzender Lebensweise entstanden sein müßte. Die Metamorphose der Echinodermen ist ein cänogenetisch stark beeinflußter Prozeß, sie kann bei Formen mit pelagischer Lebensweise (besonders bei Echinoiden) sehr lange hinausgeschoben und dann mit einer Schnelligkeit vollzogen werden, die kaum auf Erhaltung der ursprünglichen Verhältnisse hoffen läßt. Die Asteridenlarven setzen sich mit ihren Haftapparaten des oft

enormen (Asterina) präoralen Körperabschnittes fest und verwandeln sich, zumal wenn ihnen, wie der Asterina gibbosa, eine ausgesprochene Larvenform fehlt, ziemlich stetig. Der Mund wird bei dieser Festheftung dem Boden zugekehrt; er mußte aber wohl bei den anfänglich noch planktonfressenden Tieren nach oben gewendet werden und machte infolgedessen eine Wanderung nach der linken Körperseite hinauf, wobei das linke Hydrocöl mitgezogen wurde und sich hufeisenförmig einschlug. In der Tat finden wir bei persistierendem Mund (Holothurien usw.) eine solche, wenn auch zuweilen nicht auffällige Linkswanderung, und bei den Formen, deren larvaler Mund sich schließt, bricht wenigstens der definitive Mund auf der linken Körperseite (der Larve!) durch. Bei diesen Formen bleibt auch das Hydrocöl gewöhnlich einfach sackförmig (Asteroiden, Echinoiden), um erst später durch den neuen Oesophagus durchbrochen und zu einem Ring umgewandelt zu werden. Am Hydrocöl beginnen schon jetzt die ersten 5 Ausbuchtungen aufzutreten, die die Anlage der 5 Radiärkanäle darstellen. Bei der Wanderung nach links oben ist aber auch das linke Somatocöl gefolgt und hat sich ähnlich wie das Hydrocöl um den Darm hufeisenförmig eingebogen, es hat also eine orale Lage erhalten, wogegen das rechte Cölom umgekehrt etwas nach unten gesunken ist und in bezug auf den gewanderten Mund nun eine aborale Lage annimmt. Auch dieses Cölom kann, wie besonders bei Crinoiden deutlich ist, hufeisenförmig eingebogen werden. Linkes und rechtes Somatocöl schlossen den Darm zwischen sich, sie bildeten in der älteren Dipleurula ein dorsales und ventrales Mesenterium, von denen das erstere längeren Bestand haben kann. Durch die eben geschilderten Verschiebungen muß dieses Längsmesenterium der Larve offenbar eine mehr oder weniger horizontale Lage annehmen, zum Horizontalmesenterium werden. Nur bei den Holothurien scheint dieser Prozeß nur unvollkommen vollzogen, das Larvenmesenterium läuft daher beim definitiven Tier wohl von vorn schräg nach links hinten, aber die Cölome sind wenigstens mit ihrem hinteren Abschnitt nicht in völlig orale bezw. aborale Lage gebracht, was vielleicht der schwachen Wanderung des Mundes bei diesen Tieren entspricht. Das Horizontalmesenterium löst sich später fast ganz auf, der Genitalstrang des fertigen Tieres bezeichnet uns bei Eleutherozoen seine ursprüngliche Lage. Nun kommt ein weiteres hinzu. Die beiden Hörner des hufeisenförmig (ursprünglich um den Anfangsdarm) eingebogenen linken, jetzt oralen Somatocöls (die in der Larve dorsal und ventral lagen) treffen aufeinander und bilden ein Mesenterium, das natürlich senkrecht zur neuen Oralfläche und zu dem Horizontalmesenterium stehen muß und deshalb als Vertikalmesenterium bezeichnet wird. Es enthält den Steinkanal und das ihm anhängende vordere Enterocöl, das zum Axialsinus wird. Bei Asteriden mit riesigem präoralem Körperabschnitt wird nur ein Teil zum Axialsinus, während der übrige bei dem späteren Schwund des ,,Larvalorgans" zugrunde geht. Bei den Holothurien folgt, wie wir sahen, nur der vordere und zwar dorsale Teil des linken Somatocöls dem Hydrocöl, dieses dorsale Horn umwächst aber, vor den Ringkanal geschoben, den Oesophagus, stößt auf der anderen Seite wieder auf die Wand desselben Cöloms (eines kleinen Ventralhorns?) und bildet ebenfalls das Steinkanalmesenterium, während das ringförmig ausgewachsene Horn hier den später sehr großen Schlundsinus darstellt.

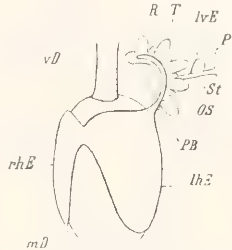


Fig. 13. Enterocölverhältnisse bei der Auricularia von Labidoplax digitata. vD Vorderdarm, mD Mitteldarm, P Porenkanal, lvE linkes vorderes Enterocöl (Madreporenblase?), T Tentakelanlagen (Primärausstülpungen), R Radiärkanalrudimente (Sekundärausstülpungen) des Hydrocölhufeisens, Pb Anlage der Polischen Blase, OS Oralsinus, l bezw. rhE linkes bezw. rechtes hinteres Enterocöl, ventral verschmelzend. Nach Reimers und Bury kombiniert.

Auch das rechte Cölom kann entsprechende Hörner und ein entsprechendes Vertikalmesenterium bilden (wie es z. B. bei Crinoiden zur Ausbildung kommt und dort zwar nicht genau, aber ungefähr die Fortsetzung des oralen Vertikalmesenteriums darstellt. Es schließt hier auch den äußeren Teil des Parietalkanals (axialen Sinus) ein, der bei Antedon später in die Leibeshöhle durchbricht und nicht mehr für sich zu erkennen ist. Von der linken Wand des aboralen Vertikalmesenteriums wird als zellige Verdickung der Axialstrang der Crinoiden gebildet, der sich nachher basal bis ins Stielende ausdehnt, von einem Raum umgeben ist (axialer Sinus?) und mit diesem zusammen noch von 5 basalen röhrenförmigen, später gegen die Leibeshöhle abgeschlossenen basalen Auswüchsen des aboralen Somatocöls eng begleitet und umschlossen wird.

Denkt man sich den Mund an der linken Seite der Larve und folgt nun dem gekrümmten Enddarm, so ist man genötigt, eine Rechtsdrehung zu machen. Mit den geschilderten Verhältnissen steht also auch die für die Echinodermen charakteristische Rechtswindung des Darmkanals in Zusammenhang (Ludwig). Sie wird noch ausgesprochener, wenn der After in bezug auf den Larvenkörper noch weiter nach vorn verschoben wird, wie das bei Eleutherozoen der Fall zu sein scheint (wegen der Bildung eines neuen Afters bei Crinoiden, Asteriden und Echinoiden aber schwer zu erkennen ist). Bei Holothurien wird der After wieder terminal, wobei aber die Windung nicht rückgängig gemacht werden kann.

Ueberhaupt scheint die durch die Mundver-

lagerung eingeleitete „Torsion" des Larvenkörpers durch eine sekundäre Symmetrisation wieder mehr oder weniger verwischt werden zu können. Der Mund kann wieder in die alte

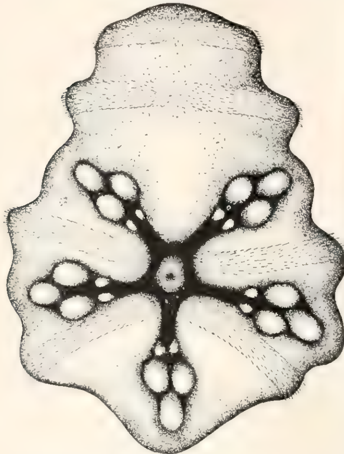


Fig. 14. Aeltere tonnenförmige Larve von Ophiura brevispina mit symmetrischem Hervortreten der 5 Radien mit Endtentakeln und ersten Füßchenpaaren. Es sind 4 Wimperringe vorhanden. Nach Grave.

Larvensymmetrieebene zurückwandern, wobei er aber nun weiter vom Präoralteil des Larvenkörpers zu liegen kommt als der vorgewanderte Mund (außer bei Holothurien) und jedenfalls die modifizierten Cölomlagerungen lediglich überträgt, ohne sie rückgängig zu machen. Außer bei Holothurien kann die „Sekundärsymmetrisation" (Heider) bei Asteriden (Asterias pallida) und besonders bei Ophiuriden (Ophiura brevispina) den Eindruck machen, daß gar keine Verschiebung der Symmetrieebene von Dipleurula und metamorphosiertem Tier vorliegt.

Die Zurückwendung der Mundscheibe zum Boden beschließt indessen die Verschiebungsprozesse noch nicht; vielmehr wendet sich die Oralseite bei den Crinoiden nunmehr vom Präoralende, das zum Stiel wird, ab („Elevation", Heider) und bringt den Stiel, der ursprünglich dorsal am oralen Körperende lag, in die direkt aborale Lage, die für die planktonfressenden Crinoiden charakteristisch und zweckmäßig ist. Bei den Eleutherozoen aber (es handelt sich hier im wesentlichen um die larval sich festsetzenden Asteriden) bleibt die Mundscheibe zwar dem Boden zugewendet, aber der Präoralteil (Stiel, Larvenrest) wird meist umgekehrt auf die Mundseite aufgebogen („Flexion", Heider). Durch die Kombination der Mundwanderung mit der Flexions- oder Elevationsbewegung kommt die seltsame Schiefstellung des jungen Echinoderms zu der Larve zustande.

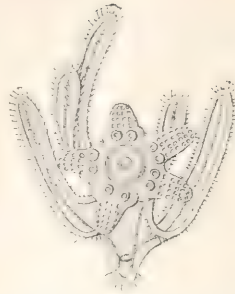


Fig. 15. Ophiopluteus mit dem jungen Ophiuriden. Nach Johannes Müller aus Korschelt und Heider.

5e) Weiterentwickelung einzelner Organe. Durch den Wechsel in der Cölomlage wird es verständlich, daß man die in horizontalen Kreisen liegenden Primärplatten (Oralia und Terminalia, primäre Interradialplatten und Radialia), von denen die Oralia und Terminalia über dem linken, die anderen über dem rechten Cölom entstehen sollen, bei jungen Larven in Längsreihen links und rechts antrifft, wie man besonders bei Ophiuriden und Asteriden zu beweisen versucht hat (Bury). Bei Antedon findet man Infrabasalia und Basalia tatsächlich über dem horizontalen aboralen, die Oralia deutlich über dem horizontalen oralen Cölom. Die Radialia fügen sich hier erst später ein. Die Columnalia, die von einem äußersten Dorsocentrale, nach oben zu jünger werdend, folgen, legen sich zuerst als sichelförmige Stücke an, die die Stielkanäle umfassen. Weiteres über Skelett s. oben und in den einzelnen Abschnitten.

Das Hydrocöl schließt sich zum Ring oder wird vom Oesophagus durchbrochen. Die Verschlußstelle liegt in bezug auf den Steinkanal verschieden, selbst in einer Klasse (Holothurien) kann sie verschiedenen Interradien angehören. Die jungen Radiärkanäle bilden durch Vortreibung der Haut einen kleinen Endtentakel, hinter dem sich immer die neuen Füßchen einschieben. Bei Holothurien können sich bei rudimentären Radiärkanälen die 5 ersten Füßchen, d. h. die Fühler, gleichzeitig mit den Radiärgefäßen vom Ringkanal aus anlegen, zweifellos ein sekundäres Verhalten, wie die Entwickelung der füßigen Holothurien beweist. Bei Crinoiden können auch die 5 radialen Gruppen erster Tentakel vom Ringkanal entspringen; wenn später die Radien von den zwischen Oralia und Basalia eingeschobenen Radialia her auswachsen, so schließt sich immer der radialste Tentakel an und wird zu einer Art Endtentakel, der in dem Winkel der ersten Armverästelung bleibt und dort schließlich verschwindet. Wenn die Radien in Arme ausgezogen sind, so bildet (Asteriden) auch das linke, d. h. orale Cölom seine 5 Ausbuchtungen wie das Hydrocöl, diese werden aber um 36 Grad im Sinne des Uhrzeigers gegen das Hydrocöl verschoben, um dann erst

den zu jedem Radius gehörigen Radiärkanal zugesellt zu bekommen. Von den Sinus wurde der Schlundsinus der Holothurien schon erwähnt. Auch sonst geht der Oralsinus vom linken Somatocöl aus und zwar in Form von 5 interradialen Blasen, die sich ablösen, bei weiterem Wachstum sich aber in den Radien treffen und so ergänzen. Eine derselben kann vom Axialsinus ausgehen (Asteriden). Der innere Oralsinus der Asteriden wird immer vom Axialsinus aus gebildet. Andererseits können der Ring- und besonders die Radiärsinus auch schizocölischen Ursprungs sein. — Der genitale Sinus entsteht als ein abgeschnürtes Säckchen im Steinkanalmesenterium vom Cölomepithel aus und kann sich von dort durch die Radien, immer dem Ansatz des Horizontalmesenteriums folgend, ausdehnen, wobei er von einer Lakune und dem gleichfalls vom Cölomepithel des mittleren poralen Mesenteriums abstammenden Genitalstrang begleitet wird. Das Axialorgan scheint manchmal einer Lakunenbildung, zuweilen aber einem cölomatischen Strang seine Entstehung zu verdanken. Einige Fragen betreffend der Entwickelung des Axialkomplexes sind noch immer dunkel. Sogar der Axialsinus scheint auch vom linken hinteren Enterocöl aus gebildet werden zu können. Genaueres über die Entwickelung des Axialkomplexes s. oben und bei den einzelnen Gruppen.

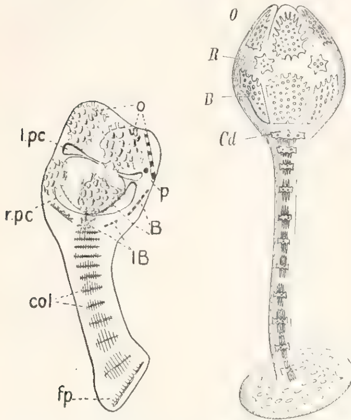


Fig. 16. Jüngeres (links. Nach Seeliger aus Bather) und etwas älteres (nach W. Thomson aus Claus-Grobben) Entwickelungsstadium von Antedon. Der Stiel mit der Fußplatte fp (Dorsozentrale) und den Columnalia col ist schon gebildet. lpc, rpc, linkes (orales) bezw. rechtes (apikales) hinteres Cölom. Ueber ersterem die 5 Oralia O, über letzterem die Basalia B und Infrabasalia IB, die in dem Stadium rechts schon in das Centrodorsale Cd aufgenommen werden. Rechts sind auch die Radialia R schon zwischen O und B eingeschoben. p Porenkanal.

Die Blutlakunen entstehen überall in situ durch Spaltbildungen im Mesenchym.

Aehnliches gilt vom Nervensystem. Das larvale Nervensystem von Antedon mit seiner Anschwellung unter dem Wimperschopfektoderm und davon ausgehenden Strängen scheint verloren zu gehen, dagegen soll sich der Nervenring be Labidoplax aus zwei stumpfwinkeligen <>, seitlich ventralen Nervensträngen der Auricularialarve bilden, die mit Teilen der Wimperschnur direkt in Kontakt stehen. Sie schließen sich um den Mund zu einem Ring zusammen.

Besondere Erwähnung verdienen noch die Amnionbildungen der Crinoiden, Echinoiden und tonnenförmigen Paractinopodenlarven. Hier bildet sich um die Mundöffnung oder die Stelle, wo dieselbe durchbrechen soll, über einer verdickten Epidermispartie eine große ektodermale Höhle, in der man die Oralfläche des jungen Tieres sich bilden sieht. Durch den Boden dieses Atriums drängen die ersten Füßchen (Fühler) nach außen usw., er wird entweder zur Mundfläche (Holothurien) oder kann einen noch erheblich größeren Teil der Epidermis des fertigen Tieres liefern (Echinoiden). Die ganz (Crinoiden) oder bis auf eine kleine Oeffnung geschlossene Amnionhöhle öffnet sich später, um die Oralseite des jungen Tieres freizugeben. Bei Crinoiden öffnen sich dabei die klappenförmigen Oralia der Vestibulumdecke, zwischen denen das Gewebe aufgelöst wird, und geben die Primärtentakel frei.

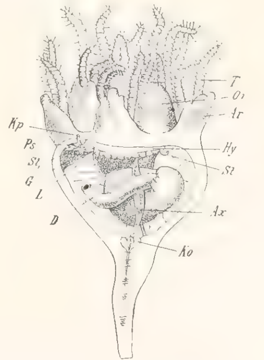


Fig. 17. Junges Pentacrinusstadium von Antedon gleich nach Oeffnung der Oraliaklappen Or des Atriums. T die 15 Primärtentakel, Ar die jungen Armanlagen, Hy Hydrocölring, St ein Steinkanal, St_1 primärer Steinkanal in den Parietalkanal Ps (vorderes Enterocöl) mündend, Kp Porenkanal, L Periösophageale Lakune, die mit der Genitallakune bis zu der embryonalen Gonade G und dem aboralen Sinus reicht und andererseits mit dem Genitalstolo Ax des Genitalorgans zusammenhängt, Ko gekammertes Organ. Nach Russo aus Claus-Grobben.

6. **Phylogenie.** Die Gründe für eine Verwandtschaft der Echinodermen und Enteropneusten wurden schon angedeutet, ebenso ihre Zugehörigkeit zu der weiten Gruppe der Deuterostomier. Die phylogenetischen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Gruppen sind noch ganz dunkel und total verschieden vorgestellt worden. Sicher ist nur eine nähere Verwandtschaft von Asteroiden und Ophiuroiden, deren Unterschiede durch das Material der vergleichenden Anatomie und Paläontologie wie auch durch ontogenetische Erkenntnis (Entstehung der Wirbel aus Ambulacralia) einigermaßen überbrückt werden. Die Sonderstellung der Pelmatozoen ist gleichfalls deutlich. Unter den Eleutherozoen scheinen die Holothurien ein seltsames Gemisch von alten (nichtstrahlige Gonaden) und sehr modifizierten Verhältnissen aufzuweisen und ziemlich allein zu stehen, obwohl sie auf den ersten Blick (großer Schlundsinus, Ausdehnung der Ambulakren, Darm und Darmatmung usw.) nähere Beziehungen zu den Seeigeln zu haben scheinen. Ueberhaupt sind viele scheinbare Homologien innerhalb des Echinodermenstammes auf selbständige Erwerbungen zurückzuführen, wissen wir doch nicht einmal, ob der Schluß des Hydrocöls, der Erwerb der Fünfstrahligkeit von Ambulakren und Gonaden sich nicht mehrmals vollzogen hat. Ebenso sind die Homologien der dorsalen und ambulakralen Platten zum mindesten jetzt noch unsicher. Innerhalb der einzelnen Gruppen steht es um die Erkenntnis der Verwandtschaftsverhältnisse etwas besser; es kann in dieser Hinsicht auf die systematische Anordnung verwiesen werden.

B. Die einzelnen Klassen.

I. Pelmatozoa (Leuckart 1848).

Die Pelmatozoen sind dauernd oder vorübergehend festsitzende Echinodermen mit kelch- bis kugelförmigem Körper, dessen Wand durch mehr oder weniger regelmäßige, polygonale Kalkplatten gepanzert ist. Der Mund und die Oralfläche sind nach oben gekehrt, der After liegt meist seitlich auf der oralen Körperhälfte und niemals im aboralen Zentrum. Im Munde laufen die (meist 5) proximalen Teile der Nahrungsfurchen zusammen, die sich gewöhnlich distalwärts verzweigen und meist auf Anhänge des Körpers fortsetzen. Bei den rezenten Formen wird in diesen Furchen ein Wasserstrom mit Nahrungspartikelchen durch die Arbeit von Wimperzellen nach dem Munde getrieben. Lokomotorische Füßchen fehlen; wenn äußere Anhänge des Wassergefäßsystems vorkommen, so dienen sie der Atmung, Sinneswahrnehmung usw. Von den Nervensystemen der Echinodermen pflegt das aborale (wenigstens bei den Formen mit beweglichen Armen) am stärksten ausgebildet zu sein. Hierhin die Klassen: Cystoidea Buch (1844), Blastoidea Say (1825), Crinoidea Miller (1821) und Edrioasteroidea (Billings 1854, Bather 1899, Thecoidea Jaeckel 1895). Von diesen Klassen weist nur die der Crinoiden lebende Vertreter auf. Ueber die übrigen vgl. Paläontologie.

Klasse Crinoidea (Miller 1821) Haarsterne.

a) Allgemeines. Die Crinoiden sind Pelmatozoen, die durch den Besitz von (ursprünglich 5) Armen ausgezeichnet sind. Die Arme stellen Fortsetzungen der 5 obersten aboralen Thecalplatten (Radialia) dar und behalten stets ihre ursprüngliche innige Beziehung zu denselben. Unter den Radialia folgen in der Theca 5 interradiale Basalia und unter diesen zuweilen noch ein dritter Ring von Platten, die Infrabasalia, die wieder radiale Stellung einnehmen. Mit den Basalia oder den Infrabasalia sitzt der „Kelch“ einem Stiel auf, der jedoch nicht selten rudimentär werden und verloren gehen kann. In der Kelchdecke liegt mehr oder weniger zentral und ursprünglich von 5 interradialen Oralia (Deltoidea) umgeben der Mund und seitlich im m. p. I. der After; sie sind durch einen rechts gedrehten Darm verbunden. Vom Munde laufen 5 Nahrungsfurchen zu den Armen und eventuellen Verzweigungen, von den den Mund umgebenden Ringen des oberflächlichen und tieferliegenden Nervensystems gehen in entsprechender Weise 5 einfache und 5 tieferliegende doppelte Stämme zu den Armen ab. Am stärksten ist das apikale Nervensystem entwickelt, das gewaltige Stämme in die Arme entsendet, den Stiel versorgt und in der Kelchbasis komplizierte zentrale Verknüpfungen aufweist. Vom Wassergefäßsystem, dem Ampullen und Klappen fehlen, ziehen gleichfalls 5 Aeste, die „Radiärkanäle“, in die Arme und geben seitlich von der Nahrungsfurche Ambulakralpapillen ab. Die Leibeshöhle, die in dem Stiel durch 5 periphere (vom rechten = apikalen Cölom herkommende) und einen zentralen (den sogenannten Axialstrang enthaltenden) Kanal vertreten wird, schickt in jeden Arm einen dorsalen (vom rechten = apikalen), zwei orale (vom linken = oralen Cölom) und einen zentralen oder genitalen Sinus, welch letzterer in einer Lakune den Genitalstrang enthält, der in den äußersten Verzweigungen der Arme zu Ovarien bezw. Hoden anschwillt. Eine primäre, im hinteren Mesenterium angelegte Gonade wird wie die zugehörige aborale Lakune beim erwachsenen Tier rückgebildet, eine ovoide Drüse fehlt.

Skelett. Das (ontogenetisch und phylogenetisch) primäre Skelett zerfällt in orale (actinale) und apikale (aborale abactinale) Elemente, von denen die ersteren über dem oralen, die letzteren über dem aboralen (rechten) Cölom gebildet und vom apikalen Nervensystem aus versorgt werden. Zum Oralskelett gehören die Deltoidea (Oralia) und die Saumplatten

(„Ambulacralia“ und „Adambulacralia“), das Apikalskelett wird von den Stammplatten (Columnalia) und den Elementen ihrer Anhänge (Cirren, Cirralia), ferner von den Infrabasalia (IBB), Basalia (BB), Radialia (RR) und endlich den Hauptstücken der Arme (Brachialia Br) und denjenigen eventueller spezialisierter Endäste derselben (Pinnulae, Pinnularia) gebildet. Zwischen die Platten des Primärskelettes können sekundäre Skelettelemente eingeschoben werden, von denen Analia, Interbrachialia (iBr), Interaxillaria (iAx), Interpinnularia und Interambulacralia genannt werden mögen (iAmb).

Der Stamm bildete ursprünglich wohl einen breiten, unregelmäßig mit Skelettplatten versehenen Fortsatz des Kelches, wurde später von 5 senkrechten flach-sechseckigen bis rechteckigen Platten gebildet, die zuerst in der Höhe abwechselten, später zu je 5 in eine Höhe kamen und meist zu einem ringförmigen Columnale verschmolzen (bei Botryocrinus schön zu verfolgen). Bei Hyocrinus, Bathycrinus und Rhizocrinus stellen die Stielglieder mit Ausnahme der jüngsten Doppelglieder (verschmolzene Syzygialpaare) dar. Der Stiel des jungen Antedon sitzt mit einer besonderen Platte, dem „Dorsocentrale“ (nicht mit „Centrodorsale“ zu verwechseln!) fest, sonst wird das untere Stielende durch eine unregelmäßige Kalkbildung (auf felsigem Boden) oder durch Bildung von Wurzelcirren befestigt, d. h. hohlen, von den vertikalen Stammsuturen ausgehenden, zuweilen verzweigten Auswüchsen, deren Skelett aus Ringen besteht, die wie die Columnalia durch Verschmelzung entstanden zu sein scheinen. Später treten Cirren auch an höheren Teilen des Stammes an vergrößerten Stielgliedern (Nodalia) auf. Die Nodalia werden entweder immer direkt unter dem Kelch eingefügt, so daß das oberste Glied das jüngste ist, oder es entstehen die neuen Nodalia in der oberen Region des Stiels zwischen einander, während das oberste Stielglied (Proximale), von dem sie sich vielleicht abgliedern (Döderlein), als eines der ältesten Nodalia immer mit dem Kelch in Verbindung bleibt oder damit verschmelzen kann. Am unteren Stielende liegen die Nodalia weiter auseinander als oben und es sind mehr Internodalia vorhanden. Der Hohlraum der Cirren ist von Nervenmasse umgeben und innen von einem Auswuchs der Kanäle des gekammerten Organs eingenommen, der von einem horizontalen bis in den peripheren Stielkanal reichenden Septum geteilt wird.

Die Stielglieder sind rund mit Radialstreifung auf den Verbindungsflächen oder fünfeckig mit meist nur marginaler Radiärstreifung, wobei die äußeren Stielkanten um 35 Grad gegen die Suturen (sowie gegen die Ecken eines eventuell fünfstrahligen Lumens und die Stränge des gekammerten Organs) verschoben zu sein pflegen. Zuweilen sind die Stammglieder von quadratischem Querschnitt (eine Platycrinoidenform) mit diagonal gestellten Gelenkgraten oder ovalrund mit Längsgrat, der in jedem Glied gegen das folgende etwas gedreht ist und so allseitige Beweglichkeit gestattet (Platycrinus, ähnlich bei Bourgetocrinidae, Bathycrinus, Rhizocrinus und dem larvalem Antedon). Bei Herpetocrinus, Camptocrinus u. a. ist der Stiel (mit 2 Cirrenreihen) in einer Ebene spiralig ein- und ausrollbar. Bei nicht wenigen alten, ausgestorbenen Formen ist der Stamm sehr weit (z. B. Barycrinus) und an seiner Wand (Barycrinus, Crotalocrinus, Traumatocrinus), an der der Wurzelcirren (Lichenocrinus) oder am Ende der Cirren (Barycrinus, Eucalyptocrinus, Cystocrinus) mit Oeffnungen versehen, die zur Wasseraufnahme und Atmung (nach Wachsmuth und Springer), zur Nahrungsversorgung des äußeren skelettbildenden Gewebes (Bather) oder zur Ausfuhr von Geschlechtsprodukten (Jaeckel) gedient haben mögen. Anpassung an stark bewegtes Wasser (Jaeckel) hat bei einigen Formen zu erheblicher Verkürzung des Stiels geführt (Cupressocrinus, Eugeniocrinidae); bei Holopus und mehreren ausgestorbenen Formen (Cotyloderma, Eudesicrinus und Cyathidium) ist der Stamm zu einer bloßen Verbindungsmasse von Kelch und Boden geworden. Bei Isocrinus und Metacrinus scheint sich die Krone mit dem fortwachsenden jüngsten Stielteil von einem Rasen zu erheben, den die langen, am Ende absterbenden und mit ihren Cirren verfilzten Hauptteile auf dem Boden bilden.

Zahlreiche Formen haben die absolut festsitzende Lebensweise aufgegeben und können, mit den Armen schwimmend, ihren Ort wechseln (Isocrinus, doch nur gelegentlich). Der Wurzelteil des Stammes geht bei solchen Formen verloren und die zeitweise Anheftung wird durch Cirren (Herpetocrinus), durch Umwindung fremder Gegenstände durch spiralige Aufrollung (Acanthocrinus rex Jaeckel) oder bulbus- (Brachiocrinus nodosarius) bezw. ankerförmige Gestaltung des Stielendes (Myrtillocrinus) ermöglicht. Das aufgeschwollene, ballonförmige Stielende (Wurzel) von Scyphocrinus wurde fälschlich als besonderes Tier beschrieben („Lobolithus“, „Camarocrinus“). Bei Calceocrinus und Mastigocrinus ist das Stammende einfach abgerundet.

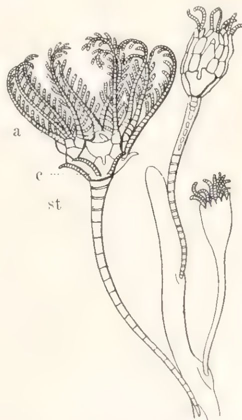


Fig. 18. 3 Pentacrinusstadien verschieden weit entwickelt. a Arme mit Pinnulae, c Cirren, st Stiel. Aus R. Hertwig.

Der Stamm beweglicher Formen wurde vielfach (selbständig) rückgebildet: bei Millericrinus pratti kommen Formen mit 50 bis zu solchen mit nur einem Stielglied (dem Proximale) vor. Auch bei den rezenten Antedon, Eudiocrinus, Promachocrinus, Atelecrinus, Actinometra und Thaumatocrinus bleibt ein kurzer oberer Teil des abgeworfenen Stieles ihrer „Pentacrinusjugendstadien" erhalten, um mit oder ohne die Infrabasalia zu einem einheitlichen Stück, dem Centrodorsale, zu verschmelzen. Bei Edriocrinus verschmelzen die Basalia, bei Agassizocrinus die IBB zu einer dicken Anhangsmasse, die zur Verankerung oder als Kiel gewirkt haben könnte. Bei Marsupites, Uintacrinus und Saccocoma fehlt jeder Anhang, es ist nur ein ganz in die Theca aufgenommenes „Centrale" unsicherer Herkunft vorhanden (Proximale?, Dorsocentrale?, bei Saccocoma Basalia?). Uintacrinus und Saccocoma waren pelagisch. Bei Rhizocrinus lösen sich die Arme oberhalb des IBr_1 („Radiale 2") leicht im Zusammenhang los und können regeneriert werden, bei Bathycrinus (Eugeniacrinus?) findet eine entsprechende Ablösung (und Regeneration) des größten Teils der Krone über den Basalia statt, man könnte Antedon auch als Endglied an diese Reihe setzen, wenn man ein weiteres Sinken der Ablösungsstelle annimmt (Döderlein). Da die Krone die Geschlechtsorgane trägt, so drängt sich der Vergleich von Polyp und Meduse auf.

Der Kelch wird je nach dem Vorhandensein oder Fehlen von Infrabasalia als „dizyklisch" oder „monozyklisch" bezeichnet. In bezug auf radiale bezw. interradiale Stellung wechseln die Radialia mit den Basalia, diese mit eventuellen Infrabasalia, die Basalia bezw. Infrabasalia mit den 5 Stücken eines Stielringes und diese mit den 5 Fortsätzen des gekammerten Organes, mit den Cirren und den Stielplattensuturen (Wachsmuth und Springersches Gesetz).

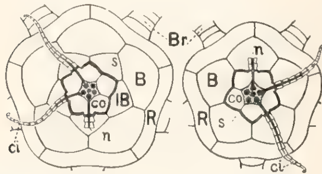


Fig. 19. Schema einer dizyklischen (links) und monozyklischen Basis. Br Arme, R Radialia, B Basalia, IB Infrabasalia, CO Pentameren der Columnalia, S Suturen der Stielpentameren. In der 5eckigen Stammhöhlung ein mittlerer und die 5 Kanäle des gekammerten Organs mit ihren in die Cirren ci gehenden Fortsätzen. Nach Bather.

Meist entsprechen die Außenkanten des Stieles den 5 Stielgliedpentameren, die Ecken der Stielhöhlung dagegen ihren Suturen, doch können diese Verhältnisse durch sekundäre Kalkablagerungen verschoben werden (Antedon, Isocrinus mit interradialen Stammlumenecken, obwohl dizyklisch; Glyptocrinus fonshelli mit radialen Stammlumenecken, obwohl monozyklisch), so daß große Vorsicht geboten ist, wenn man bei paläontologischem Material auf Grund dieser zwei Stielkennzeichen das Gesetz anwenden will, um zu entscheiden, ob ein Crinoid mono- oder dizyklisch ist. Im allgemeinen aber läßt sich auch ohne Kenntnis der Infrabasalia an der radialen Lage von Cirren, Stielgliedsuturen und Stielsträngen eine dizyklische Form erkennen.

Das ist von Wichtigkeit, weil viele dizyklische Formen durch Verkümmerung oder Verlust ursprünglich vorhandener IBB „pseudomonozyklisch" werden, wie die Entwickelungsgeschichte bei Antedon, die Paläontologie bei Isocrinus und Apiocrinus und die Lage der Stielstränge bei Rhizocrinus beweist. Bei Metacrinus acutus konnte Döderlein zum ersten Male bei einer ausgebildeten rezenten Form die wie bei Millericrinus zwischen den BB verborgenen IBB direkt nachweisen. Die Entstehung echter Monocyclica (ohne die die Herkunft verratenden Kennzeichen der Pseudomonocyclica) aus dizyklischen Formen ist schwer zu verstehen, auch wenn man eine Verschiebung der Radialia senkrecht über die Basalia bei manchen Dicyclica (Ottawacrinus) heranzieht, die bei kambrischen und silurischen Monocyclica häufige horizontale Trennung der RR in Super- und Infraradialia damit vergleicht und spätere Verschmelzung der übereinanderliegenden Platten annimmt. (Dagegen spricht, daß auch bei den Dicyclica ein Radiale inferius vorzukommen scheint, als solches [r. p. Ri.] wird das Radioanale gedeutet.) Es gewinnt daher den Anschein, daß Dicyclica und Monocyclica sehr frühzeitig getrennte, aber vielfach parallele (z. B. Iocrinus und Heterocrinus [monozyklisch], Merocrinus, Ottawacrinus [dizyklisch]) Weiterentwickelung aufweisende Linien und natürliche systematische Hauptgruppen darstellen (nach Bather).

Häufig kommen Verschmelzungen im apikalen Plattenring vor (z. B. von einem Plattenpaar, r. und l. a. B. bei Monocyclica); wenn 2 Paare verschmelzen, so bleibt bei Monocyclica das l. a. B. oder selten das l. p. B., bei Dicyclica Inadunata meist das m. a iB., bei Dicyclica Flexibilia das r. p. IB. als kleine Platte übrig (bei Blastoideen das r. a. B.). Bei Monocyclica kann eine in der Symmetrieebene zweigeteilte Basis vorkommen, und endlich kann sowohl bei Mono- als auch bei Dicyclica der ganze basale Plattenkreis verschmelzen (bei Flexibilia die IBB mit den proximalen Columnalia). Bei Eugeniacrinus werden die BB von den RR überwachsen und aufgenommen.

Dadurch, daß ein Anale oder sekundäre Kelchplatten zwischen die RR rücken und das tragende B zur Vergrößerung veranlassen, kommt besonders bei Monocyclica (selten bei Dicyclica) eine sechs- oder gar zehneckige (Xenocrinus) (meist vier- bis zweiteilige) Basis zustande, die beim Schwinden der störenden Elemente wieder fünfeckig (vierteilig manche Melocriniden) werden kann. Endlich kann die Theca durch Vergrößerung (Pisocrinus), Teilung (Heterocrinus), Verlust (Tetracrinus) oder Verdoppelung (Promachocrinus) und besonders durch Umbiegen der Krone (Verkleinerung von RR) bei Eugeniacrinidae, Calceocrinidae und einem Agassizocrinus (nicht festsitzend!) mehr oder

weniger stark beeinflußt werden. Der Kelch kann dadurch eine erhebliche Vergrößerung erfahren, daß basale Brachialia in ihn aufgenommen werden, indem sie sich entweder seitlich direkt verbinden (Ichthyocrinus), oder aber durch eine mit sekundären Platten versehene Membran vereinigt werden. Diese manchmal sehr kleinen Platten (Isocrinus, Calamocrinus) werden gewöhnlich größer und nehmen damit eine regelmäßige Anordnung an. Die zwischen zwei Armen gelegenen supplementären Platten heißen Interprimibrachialia (iIBr), die in der ersten Armverzweigung iIIBr, ebenso kommen iIIIBr und bei manchen Formen sogar entsprechende sekundäre Platten bis zwischen die Pinnulae vor: Interpinnularia (z. B. bei Uintacrinus). Im m. p. I. verläuft zwischen den iBr häufig eine bei Cameraten mediane besondere Reihe von Analplatten, die einem eventuell vorhandenen Analrohr zur Stütze dient und sich in dessen senkrechte dorsale Plattenreihe direkt fortsetzen kann (Glyptocrinus, Reteocrinidae). Bei Formen mit unstarren Interradialzonen (alte Formen) zeigt die Analreihe eine Kante, die auf das Vorhandensein eines apikalen Nervenstammes hinweist. Bei Inadunaten und Flexibilia erweckt die mittlere Analreihe den Eindruck, ein basalster Seitenzweig des r. p. Armes zu sein; denn sie entspringt bei Iocrinus, Merocrinus, Castocrinus, sowie bei Heterocrinus, Ectenocrinus und Ophiocrinus von der oberen Hälfte des r. p. R., dessen untere Hälfte als Radioanale (RA) bezeichnet wird. Vom r. p. R. scheint auch die Innervation erfolgt zu sein (Iocrinus, Heterocrinidae). Nun fällt aber die erste Platte (x) der am weitesten in den Kelch (oft zwischen die RR) reichenden analen Plattenreihe nicht (wie bei Iocrinus und Heterocrinus) immer zusammen mit der Platte, die dem r. p. R. aufsitzt (t und rt) (Dendrocrinus, Scaphiocrinus, Cyathocrinus usw.), so daß nicht feststeht, ob alle basalsten oder alle dem r. p. R. aufsitzenden Platten zu homologisieren sind. In der Phylogenie mancher Dicyclica Inadunata des Karbon (Ulocrinus) läßt sich eine Aufwärtswanderung von Platte x und in der Entwickelung von Antedon eine entsprechende Verschiebung (und Rudimentation) des mit x homologisierten Anale feststellen.

Tegmen. Wie bei Vergrößerung des Kelches durch Fixierung der Arme und Bildung von iBr, so treten auch in der vergrößerten Kelchdecke häufig sekundäre Platten auf, die je nach ihrer Lage zwischen den 5 Hauptstämmen der Futtergruben und ihrer „Ambulakral"-(Saum-)Plattenreihen oder zwischen den Aesten von Verzweigungen als iIAmb, iIIAmb, iIIIAmb usw. unterschieden werden. In dem m. p. I., zwischen dem Mund und der Platte x, treten sie besonders häufig auf, umgeben den Anus (z. B. bei Hybocrinus als eine Klappenpyramide) und bilden nicht selten ein hohes Analrohr unter dem After. Das Primärskelett des Tegmen besteht aus Oralia (O) und Ambulacralia (Amb). Die Oralia werden bei Antedon über dem Atrium gleichzeitig mit den Basalia angelegt, noch bevor sie von ihnen durch die später auftretenden RR und sekundäre Platten getrennt werden, später öffnen sie sich über dem Atrium und werden endlich bei den meisten Antedonidae (Bathycrinus und Calamocrinus) fast oder ganz rückgebildet. Diese Oralia werden weiter mit 5 ähnlichen Platten der rezenten Hyocrinus,

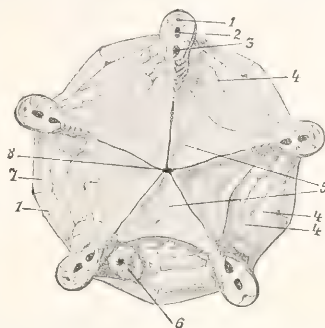


Fig. 20. Mundscheibe (Tegmen) von **Hyocrinus bethellianus**. 1 Nervenkanal der Brachialia, 2 Cölomkanal, 3 Nahrungsfurche, von ambulakralen Platten umgeben, 4 Interambulakralplatten des Tegmen, 5 Oralia, 6 Analpyramide, 7 Radialia, 8 Mund. Nach P. H. Carpenter aus Lang.

Holopus, Rhizocrinus, Thaumatocrinus und der Deltoidea der ausgestorbenen Gattungen Hybocrinus, Haplocrinus, Carabocrinus usw. verglichen, eine Homologisierung, die durch die entsprechende Lage des Madreporiten im m. p. O. bei der Antedonlarve, dem erwachsenen Hyocrinus, Hybocrinus und durch die Lage des Afters (bei Haplocrinus vereinigt mit dem Madreporiten in O.?) zwischen dem m. p. O. und dem m. p. R. bestätigt wird. Das Vorkommen von hydrospirenartigen Bildungen (vom Codastertyp) auf den O. von Hybocrinus und Carabocrinus würde dann eine Gleichsetzung mit den Deltoidea der Blastoideen nahelegen. Diese von manchen Autoren (Bather) auf entsprechende Platten von Coccocrinus, Symbathocrinus, Pisocrinus, Allagecrinus, Myrtillocrinus, einige Platycrini und Taxocrinus intermedius ausgedehnte Homologisierung wird von Wachsmuth und Springer bestritten, sie vergleichen die Oralia mit den den Mund bedeckenden interradialen Platten der Cyathocrinidae (z. B. Gissocrinus) und Crotalocrinidae, die nach Bather als vergrößerte proximale Amb gedeutet werden müssen (wie sie auch bei Blastoideen vorkommen). Auch gewisse vorragende radiale Platten des Tegmen (radiale Domplatten) werden als umgebildete (axillare) Amb gedeutet.

Die Nahrungsfurchen können entweder über (Euspirocrinus, Cyathocrinus, Cupressocrinus), zwischen (Taxocrinus und viele Flexibilia) oder unter den Oralia zum Munde verlaufen (Adunaten und Cameraten). Im ersten und im dritten Fall pflegt der Mund von proximalsten Amb, von den Oralia oder von Jamb bedeckt zu sein; im letzteren Falle können die Furchen mitsamt den Saumplatten bis zum Rand der Kelchscheibe in die Tiefe sinken und von dicken Interradialplatten überwachsen werden, die Fortsätze nach innen ab-

geben, welche sich in der Höhe der Saumplatten zu einer Art innerer Scheibe ausdehnen können (Camerata, Palaeocrinoidea früherer Autoren).

In der Kelchdecke finden sich gewöhnlich (in oder zwischen den Platten) Porenkanäle. Bei primitiven Formen und bei Jugendstadien (Antedon) haben wir nur ein Madreporit im m. p. I., bei anderen tritt eine Vermehrung auf 5 (1 in jedem I.) ein, wobei den Porenkanälen 5 gleichfalls in die Leibeshöhle mündende Steinkanäle gegenüber zu liegen pflegen (Rhizocrinus). Bei Hyocrinus findet sich ein Porus auf dem m. p. Orale und je 3 bis 5 Poren in den übrigen J. der Mundscheibe, nicht aber auf den O. Häufig werden die ,,Kelchporen" sehr zahlreich (über 1000), wobei die Konkordanz mit den Steinkanälen verloren geht; die Poren finden sich dann zuweilen auch am Oberrand oder auf Seitenteilen des Kelches, besonders in der Nähe der Nahrungsfurchen, auf den Armen und sogar auf den Pinnulae (in deren Cölomkanal sie münden: Actinometra). Bei manchen ausgestorbenen Formen kommen nur 10 Poren vor die bei Gilbertsocrinus an den Enden von 5 großen gegabelten Auswüchsen der Interradialzonen stehen. Dolatocrinus hat 4 bis 6 in jedem I. und 2 bis 4 zwischen jeder Reihe fixierter IIBr. Bei Batocrinus, Strotocrinus, Steganocrinus, Eucladocrinus kommt je ein Porus auf einen der (alternierend) direkt vom Kelch entspringenden Armäste. Ueberhaupt pflegen bei Cameraten (Melocrinidae, Batocrinidae, Actinocrinidae, Rhodocrinidae) die Poren nahe den Armursprungsstellen, am Anfang der Kelchdecke zu liegen, von wo sich innere Fortsätze der Decke an sie anschließen. Zuweilen sind auch die Suturen oder (die oft mit tiefen Axialfalten versehenen) Platten des Analtubus von Poren durchbrochen, überhaupt wird letzterem eine Atmungsfunktion zugeschrieben, da der After zuweilen schon ziemlich tief an seiner (a.) Seite mündet.

Armskelett. Bei Hybocystis fehlen dem l. und r. a. R. die Arme, und die Nahrungsfurchen laufen über Deltoide und Radialia bis auf die BB hinab. Dagegen finden sich auf dem m. a. und l. und r. p. Radiale ein bezw. zwei Kalkglieder, die beginnende Armbildungen darstellen dürften, über die die Nahrungsfurchen von der oralen zur apikalen Seite hinweglaufen und bis auf die BB gehen. Die Dreistrahligkeit der Armbildung ist vielleicht primitiv, sie steht in Einklang mit der Tatsache, daß sich links und rechts die porale und antiporale Nahrungsfurche oft wie 2 Aeste eines Stammes ausnehmen (Crinoideen und Cystoideen). Ein einfacher ungeteilter Crinoidenarm (wie z. B. bei Hybocrinus) weist als apikalen Teil seines Skelettes nur eine Reihe von ,,Brachialia" auf (uniserial), die auf der Oralseite eine tiefe Furche besitzen. Der basalste Teil der Furche wird meist als besonderer Kanal abgetrennt, er enthält den apikalen Nervenstamm. Meist verzweigen sich die Arme und zwar isotomisch (regulär dichotomisch, wenig modifiziert bei vielen Cyathocrinidae) oder heterotomisch. Im letzteren Falle kommt es bei Haupt- oder Nebenästen (Rami bezw. Ramuli) zu einer fiederförmigen Anordnung der letzten Aestchen an einer scheinbaren Hauptachse (Sympodium) dadurch, daß bei einer Verzweigung das linke, bei der nächsten das rechte allein dicker bleibt und sich weiter verzweigt. Wenn die letzten Aestchen von aufeinander folgenden Brachialia abgegeben werden, so werden sie Pinnulae genannt. Diese Entstehungsweise der Pinnulae kann bei Botryocrinusarten palaeontologisch-phylogenetisch schön verfolgt werden. Jaekel bezeichnet die so entstandenen Pinnulae (der Inadunaten und neozoischen Crinoiden) als ,,ramuli" im Gegensatz zu den mit Doppelreihen von Skelettstücken versehenen ,,Pinnulae" der Cladocrinoidea (Cameraten), die er mit den Fingern der Cystoideen homologisiert. Doch läßt sich die vom Distalende fortschreitende Zweireihigkeit der Pinnulae und pinnulaetragenden Aeste[1]) auch durch Nebeneinandergedrängtwerden der einzelnen Glieder des Scheinstammes erklären. Durch Verschmelzung (bei Cameraten) eines solchen oder weiter mehrerer aufeinander folgender Paare entstehen dann zusammengesetzte Glieder mit einem oder mehreren Pinnulapaaren. — Die Brachialia bis zur ersten Armverzweigung heißen Primibrachialia (IBr, von der Basis als IBr_1, IBr_2 usw. gezählt), die von dort bis zur zweiten: Secundibrachialia (IIBr), so geht es weiter bis zu den ,,Finalia" der unverzweigten Armäste oder den Pinnularia. Die eine Verzweigung abgebenden obersten IBr, IIBr, IIIBr heißen Axillaria und zwar Primaxillaria: IAx, IIAx usw. Der Stamm eines pinnulaetragenden Astes besteht nur aus Ax (IAx und die proximalen IIBr bei Saccocoma mit paarigen Blättchen).

Die Saumplatten (Ambulacralia) der Oralseite der Arme und ihrer Verzweigungen korrespondieren nicht mit den Brachialia; sie können über der Nahrungsfurche geöffnet und geschlossen werden (sie alternieren auf den beiden Seiten). Die ambulacralen Platten können parallel der Armachse ein oder mehrmals geteilt werden, im ersteren Falle entstehen jederseits eine Reihe ,,Seitenplatten" (Adambulacralia) neben den damit abwechselnden Saumplatten, mehrfache Teilung ergibt Reihen, die an Pinnulae erinnern können. Auch bei den Ambulacralia (die wie die Adamb nicht ohne weiteres mit denen der Asteriden homologisiert werden dürfen) unterscheidet man Primamb. (IAmb), IIAmb usw., vor der ersten, zweiten usw. Teilung. Die in den Kelch oder das Tegmen aufgenommenen Br und Amb werden durch einen Strich über ihrem Zeichen charakterisiert: $\overline{Br}$.

Nicht selten finden in longitudinaler oder lateraler Richtung Verschmelzungen in den Armen statt. Bei Eucladocrinus verbinden sich IIBr, bei Melocrinus die IIIBr der Arme, ähnlich bei Gissocrini; am auffallendsten sind die Verhältnisse bei Crotalocrinus, bei dem sich alle Br durch seitliche Fortsätze zu einem die ganze Krone umfassenden oder wenigstens 5 radiale Flächen bildenden biegsamen Netzwerk verbinden, und bei Petalocrinus, bei dem jeder Arm mit seinen Aesten zu einer horizontalen dreieckigen Platte verschmilzt.

Die primitive Verbindung der Skelettelemente durch Fasern des Grundgewebes differenziert sich oft entweder zur festen oder gelenkigen Verbindung. Bei ersterer unterscheidet man feste Sutur (oft bei Kelchplatten),

[1]) Die einfachen Arme sind immer uniserial.

Syzygie, d. h. feste, oft durch Fortsätze verstärkte Verbindung von Columnalia oder Brachialia, von denen das obere Cirren oder Pinnulae trägt (das untere derselben eventuell entbehrt) (die Syzygie dient bei freien Formen oft als präformierte Bruchstelle [von A. H. Clark bestritten] der leicht regenerierenden Arme), und Ankylosis, d. h. Verlötung durch verbindendes Kalkgewebe. Die lose Sutur (häufig bei Platten des Tegmen, des Stieles und der Pinnularia) geht durch Ausbildung eines Gelenkwulstes und besonderer Ansatzstellen für elastische Bänder (bifascial, trifascial) und Muskeln in mehr oder weniger vollkommene Artikulation ohne oder mit zentraler Durchlochung über (Brachialia, echte Muskeln meist an der oralen, kontraktile Faserzellen an der apikalen Seite des Gelenkwulstes).

Der innen an Wimpern und Drüsenzellen reiche Darm geht von dem oft überdachten Munde in einer Rechtswindung im Sinne des Uhrzeigers zum After, wobei er mehr horizontal verlaufen oder bis in die Spitze des Kelches hinabsteigen kann. Bei manchen Formen (Bathycrinus, Rhizocrinus, der Larve von Antedon, beim ausgebildeten Tier nur schwach) kann Anfangsdarm (Oesophagus), Mitteldarm (Magen eventuell mit dorsaler Aussackung: Rhizocrinus) und Enddarm unterschieden werden. Bei Antedon sind an der Magenober- (Innen-) Seite Ausbuchtungen (Pentacrinus, Bathycrinus) und ferner links zwei etwas verästelte zentralwärts gerichtete leberartige Anhängsel und außerdem eine blindsackartige Fortsetzung des Magenanfanges über den Oesophagusansatz hinaus vorhanden; Rhizocrinus und Bathycrinus (vielleicht auch der silurische Habrocrinus) zeigen interradiale, von Brachialiafortsätzen gestützte Diverticula. Hyocrinus und Actinometra haben einen ziemlich glatten Darm ohne gesonderten Magen. Der ursprünglich ungefähr zentrale Mund kann mitsamt den Nahrungsfurchen durch Zentralwärtsrücken des dem m. p. I. angehörigen Afters und eines eventuell vorhandenen Analrohres antiporalwärts gedrängt werden (Bathycrinus, Siphocrinus, Actinometra). Meist beträgt die Darmwindung ungefähr 360 Grad. Bei Cameraten, bei denen der Darmverlauf manchmal noch aus dem verkalkten „gewundenen Organ“ erkannt werden kann, waren 3 oder mehr Windungen vorhanden.

Bei Actinometra wird der Mund trotz seiner seitlichen Lage von der einen normalen Darmwindung umkreist, er liegt aber außerhalb einer Reihe weiterer um den zentralen After laufender Spiraltouren des Darmes (exozyklische Formen).

Leibeshöhle. Das ursprünglich rechte Cölom kommt beim fertigen Tier in apikale, das linke Cölom entsprechend in orale Lage. Zwischen beiden bildet sich ein horizontales Mesenterium, außerdem aber kommen durch Zusammenlegen der Enden jeder Cölomblase für sich noch zwei vertikale Mesenterien zustande, von denen das orale im m. p. I., das apikale im r. p. I. liegt. Alle diese Mesenterien werden später aufgelöst, nur das poroorale erhält sich längere Zeit. Der vereinheitlichte Leibeshöhlenraum des Kelches wird dann später von zahlreichen Gewebsbalken durchwachsen;

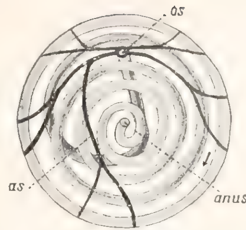


Fig. 21. Darmverlauf und Nahrungsfurchen (as) von Actinometra. os Mund. Nach Lang.

sie bestehen im wesentlichen aus einer mesenchymatischen, oft Spiculabalken bildenden Achse mit einem Cölomepithelüberzug. Durch stärkere Ausbildung des Balkenwerkes in bestimmten Zonen scheint sich manchmal eine parietale Außenzone von einer visceralen Innenzone (durch den sogenannten „Eingeweidesack“) scheiden zu können, nicht ganz zentral in der letzteren bleibt ein Raum von Trabekeln frei: die axiale Leibeshöhle. Am apikalen und besonders am oralen Ende stehen die überhaupt nicht streng geschiedenen Leibeshöhlenzonen in ungehinderter Verbindung. Von dem aboralen Cölom entwickeln sich 5 lange (bei Dicyclica radiale, bei Monocyclica interradiale) Fortsätze in den Stiel, die später von der Leibeshöhle völlig abgeschlossen zu werden scheinen und an ihrem oberen Ende angeschwollen sind und das „gekammerte Organ“ bilden. In den cirrentragenden Nodien wiederholt sich das Anschwellen der Kanäle, die von dort in die zugehörigen Cirren je einen oberen und einen unteren Kanal abgeben, welche von einer dünnen, auch die 5 Kanäle durchquerenden Scheidewand getrennt werden. Die Scheidewand bildet jedoch keinen Verschluß jedes Stielkanales, sondern läßt seitliche Oeffnungen übrig, während er zentralwärts an der Innenwand der Stielkanäle angewachsen ist. Bei Antedon finden wir dieselben Verhältnisse, nur ist das gekammerte Organ auf seinen oberen weiteren Teil beschränkt, der gegen die Kelchhöhle durch die „Rosette“, d. h. die nach innen als eine (bis auf einen Zentralkanal vollständige) Scheidewand vorspringenden Basalia, abgeschlossen wird. Zwischen den 5 Kanälen des gekammerten Organes bleibt ein 6. zentraler Raum frei, der auch oben geschlossen (Isocrinus) oder mit der axialen Leibeshöhle in Zusammenhang stehen kann. Er enthält in seinem Innern den sogenannten Achsenstrang.

In die Arme erstrecken sich hauptsächlich 2 große Kanäle, von denen der eine an der Apicalseite verläuft (Dorsal- oder Cöliacalkanal), während der andere, der häufig durch Septalstränge in zwei nebeneinanderliegende Stämme unvollkommen getrennt ist, mehr an der oralen Armseite liegt und als Ventral-Oral- oder Subtentakularkanal bezeichnet wird. Beide liegen in der actinalen Rinne der Radialia und sind durch ein zuweilen unvollständiges und zumal an den Armenden (Pinnulae) schwindendes Septum getrennt. Vielleicht stellt der Dorsal-

kanal einen Auswuchs des dorsalen, der ventrale einen Fortsatz des oralen Cöloms dar. In dem Dorsalkanal, dort, wo er bei Antedon rosacea u. eschrichtii Fortsätze zwischen die Glieder und Muskeln schiebt, befinden sich seitlich gelegene, stark bewimperte, an die Wimperrinne der Ophiuridenarme erinnernde (Hamann) Partien. Sie werden in den Pinnulae besonders auffallend und bestehen dort aus Gruppen zahlreicher säckchenförmiger Epitheleinstülpungen (Pentacrinus, Antedon, Actinometra), die an der Dorsalwand des dorsalen Kanales, an den mittleren muskelfreien Partien jedes Gliedes liegen und sich etwas in das Kalkgewebe des Gliedes versenken können. Der Rand jedes Wimpersäckchens (Wimperkörbchens) ist mit hohen dünnen Geißelzellen besetzt, die eine gewisse Aehnlichkeit mit den Synaptidenwimperurnen bedingen (Ludwig).

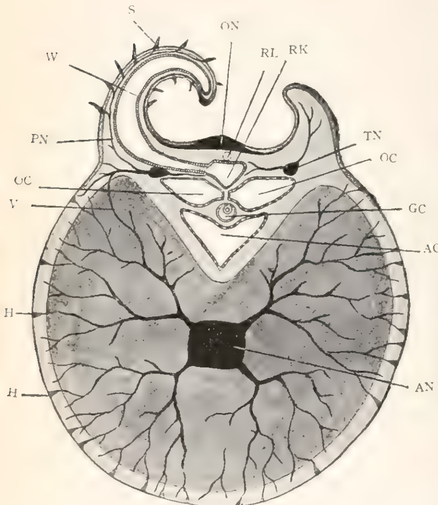


Fig. 22. Armquerschnitt eines Crinoiden ohne Saumplatten. ON oraler, TN tiefer liegender, AN apikaler Armnervenstamm, RL radiäre Lakune, RK radiärer Wassergefäßkanal, OC oraler, AC apikaler Cölomkanal, GC genitaler (Sinus) Armkanal mit Lakune und Genitalstrang, H Nervenendigung der Haut, V Verbindungsnerv von TN und AN, PN Nerv, W Wassergefäß der Ambulakralpapille (Tentakel), S Sinneskegel derselben. Nach Lang.

Außer dem Dorsal- und Ventralkanal treten in die Trennungsschicht zwischen beiden besonders in der Nähe der Scheibe Fortsetzungen der Leibeshöhle ein (in die häufig Porenkanäle von außen münden), die den Genitalstrang der Arme begleiten und sich weiter distalwärts auf einen ihn umschließenden Sinus beschränken.

Wassergefäßsystem. Das Wassergefäßsystem liegt mit seinen radiären Kanälen überall dicht unter den Nahrungsfurchen, die es auf den Armen bis in die letzten Verzweigungen und auf der Mundscheibe bis zu der zentralen Ringfurche begleitet, überall nur durch eine dünne Bindegewebslage von dem oralen Nervensystem getrennt. Es ist überall mit Längsmuskelfasern versehen, die in den Arm- und Pinnulaekanälen auf die orale Seite beschränkt werden. Außerdem wird das Lumen von Epithelmuskelzellen quer durchsetzt, die offenbar die den Crinoiden fehlenden Ampullen der übrigen Echinodermen in mancher Beziehung ersetzen. Von dem pentagonalen, in dorsoventraler Richtung etwas komprimierten Ringkanal gehen an der Innenseite die mit Klappen versehenen (Antedon, Pentacrinus) Kanäle für die Mundtentakel ab, von denen z. B. Rhizocrinus 2 Paare in jedem Interradius besitzt. Bei der Antedonlarve ist zunächst nur ein Steinkanal vorhanden, der in das vordere Cölom mündet, später finden wir 5 sich in Spalten der Leibeshöhle öffnende Steinkanäle, in jedem Interradius einen. Beim ausgewachsenen Tier trifft man endlich sehr zahlreiche (bei Antedon etwa 150) Steinkanäle an. Dagegen bleibt bei Rhizocrinus (und dem fossilen Actinocrinus verneuillanus) die Zahl 5 des larvalen Antedon erhalten. Dabei sind dann auch nur 5 korrespondierende, aus der Leibeshöhle nach außen führende Porenkanäle vorhanden, während deren Zahl gewöhnlich mit dem Alter sehr zunimmt (bei Antedon z. B. bis 1500 usw.). Am häufigsten sind sie in V-förmigen Zonen jedes Interradius der Scheibe angeordnet, dehnen sich aber auch auf die Arme aus, wo sie in zentrale, den Genitalstrang umgebende Fortsetzungen der Leibeshöhle einmünden und von langer, schmaler Gestalt sind. In der Kelchdecke besitzt jeder Kanal eine mittlere, dicht mit Wimpern besetzte Erweiterung.

Die äußeren Anhänge des Wassergefäßsystems bilden die erwähnten Mundtentakel und die regelmäßig abwechselnd auf jeder Seite der Nahrungsfurchen stehenden Gruppen von je 3 Ambulakralpapillen (-tentakeln), die von einem gemeinsamen Seitenast der Radial- oder Pinnulakanäle gespeist werden. Der distale Tentakel in jeder Gruppe ist der längste, der proximale der kürzeste. Alle Papillen sind nach außen von der dünnen Bindegewebslage mit hohem Epithel (besonders an der Innenseite: Antedon rosac. oder am Ende: Antedon eschricht.) und mit Sinnespapillen versehen. Die Tentakelkanäle fehlen dort, wo die Nahrungsfurchen fehlen, z. B. auf den proximalen Pinnulae der Scheibe (Antedon) oder auf manchen Armen von Actinometra.

Nervensystem. Wir haben 3 Nervensysteme zu unterscheiden, nämlich das orale = epineurale, das tieferliegende mittlere oder hyponeurale und das apikale oder dorsale. Die Herkunft der beiden letztgenannten Systeme scheint enterocölisch, das erstere ist deutlich ektodermaler Natur. Es verläuft als ein Ganglienzellen aufweisender Faserstrang zwischen den basalen Enden der hohen wimpertragenden Zellen der Nahrungsfurchen auf den Armen und ihren Verzweigungen. Proximal setzen sich die Nerven subepithelial weit in den Darm fort, ein zirkumoraler Nervenring (Ludwig) soll nach Jickeli und Hamann diesem Nerven-

system nicht zukommen. Mit dem oralen Nervensystem stehen die Fortsätze der dünnen Epithelsinneszellen in Verbindung, die neben Stützzellen das polsterartige Epithel der Nahrungsfurche bilden. (In den furchenlosen Oralpinnulae läuft ein Nervenstrang an der Dorsalseite eines Kanales der Oralseite, der vielleicht als geschlossene Nahrungsfurche aufgefaßt werden muß (Cuénot).

Das mittlere oder tieferliegende Nervensystem besitzt dagegen einen einheitlichen Zentralteil in einem Nervenring, der etwas weiter ist als der nur wenig höher liegende Wassergefäßring. Von den 5 Ecken des etwas pentagonalen Nervenzentrums (die durch Fasern unter den Anfangsteilen der Radiärkanäle gebildet werden) gehen etwas seitlich in jeden Arm und in alle Verzweigungen je 2 Nervenstämme ab, die zur Seite der Oralkanäle verlaufen, immer einen Ast an die Ambulakralpapillen abgeben und auch das Wassergefäß des Armes innervieren und die Epidermis der Armseiten versorgen. Vom Nervenring werden die Mundtentakel, das Analrohr und überhaupt die Munddecke einschließlich der Kelchporen mit Nerven versehen. Einige Züge dringen durch die Balken des Bindegewebes in den Kelch selbst ein.

Das dritte, das aborale oder apikale Nervensystem verläuft vom Stiel bis zu den Pinnulae in den apikalen Skelettstücken. Im Stiel bildet es eine Umhüllung der 5 Kanäle und entsendet eine entsprechende gemeinsame Umhüllung um den Doppelkanal jeder Cirre. Im gekammerten Organ schwillt die nervöse Hülle außerordentlich stark an und entsendet 10 starke Nervenstränge durch die Kelchplatten den Armen zu. In den Basalia finden wir (interradial) immer zwei dieser Stränge zusammen, sie trennen sich aber bald, um in den Radialia mit den seitlichen Nachbarn Doppelstämme zu bilden, die nun zusammen bleiben, bis zum ersten Axillare. Von der Stelle, wo die Doppelstränge in den Radialia zusammentreten, verlaufen interradiale Verbindungen zwischen den Stämmen, so daß ein einheitlicher Ring entsteht. In den Basalia können (Isocrinus) 5 entsprechende interradiale Kommissuren auftreten. Bei dizyklischen Crinoiden ohne verkümmerte IBB scheinen die 10 Nervenstränge ein ähnliches Verhalten wie zwischen RR und BB zwischen BB und IBB wiederholen zu können. Bei der Teilung der Doppelstämme in den IAx (Distichalia) wird ein kompliziertes Chiasma gebildet. Zunächst bildet sich ein abgekürzter Weg für Impulse, die von einem der Zweigstämme direkt auf den anderen übergehen wollen. Von den peripheren Ecken des so in der Nervengabel gebildeten Dreiecks laufen aber noch zwei sich über- (nicht „durch"-) kreuzende Bündel, die Reize von einem Ast durch den anderen Stamm zur Scheibe leiten. In den Armen läuft das apikale Nervensystem in einer oralen Furche (am Distalende) oder im allgemeinen durch Verschluß derselben in einem zentralen Kanal der Brachialia und Pinnularia. Von diesem Stamm gehen in der Mitte der Brachialia nach der einen Seite der Pinnulaast und nach der anderen ein Zweig ab, der sich mit dem Strang des mittleren Nervensystems der betreffenden Seite vereinigt. Außerdem treten noch 4 Aeste aus: 2 dorsale und 2 ventrale, von denen die Verzweigungen der ersteren sich durch das Kalkgewebe zur Haut und deren Sinneszellen, die ventralen aber zum großen Teile in die Brachialmuskulatur begeben. — Nach den Experimenten von W. B. Carpenter, Marshall und Jickeli reguliert das apikale Nervensystem die Bewegungen von Cirren, Armen und Pinnulae, die sich auch nach Entfernung des Körpers aus dem apikalen Plattensystem noch koordiniert bewegen können.

Sinnesorgane. Von eigentlichen Sinnesorganen sind nur die Sinnespapillen der Ambulakraltentakel bekannt. Sie bestehen aus etwa 5 dünnen, am Grunde angeschwollenen und mit Kernen versehenen einzelligen Drüsen und 4 langen dünnen, an ihrer Basis etwas dickeren Zellen, die auf ihrem freien Ende je ein etwas nach außen gerichtetes Sinneshaar tragen und in ihrer Mitte eine muskulöse (Cuénot, Reichensperger) Faser einschließen. Kontraktion der Faser und Ejakulation des (giftigen?) Drüsensekretes dienen vielleicht zur Betäubung kleiner Tiere für die Nahrungsfurchen. Hohe Sinneszellen

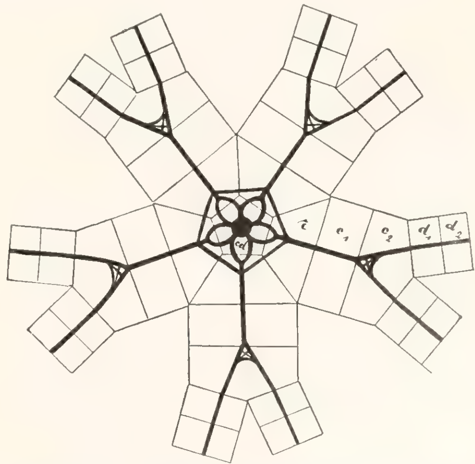


Fig. 23. Axiales Nervensystem von Antedon. Schema. CD Centrodorsale, r Radiale, c_1 Primibrachiale 1 (Costale), c_2 Axillare 1, d_1, d_2 Sekundibrachiale 1 und 2 (Distichalia). Aus Lang.

finden sich besonders in dem Epithel der Nahrungsfurchen und auf der Apikalseite der Arme usw.

Geschlechtsorgane. Die Geschlechtsorgane sind in den Armen am stärksten entwickelt. Sie bilden dort einen mehr oder weniger röhrenförmigen Genitalstrang, der an der Wand oder (durch kleine Fädchen gehalten) in der Mitte einer Blutlakune, des Genitalgefäßes, gelegen ist. Letztere ist durch kleine Stränge in einem weiteren Rohr, dem Genitalkanal oder Genitalsinus aufgehängt und verläuft mit diesem in dem Trennungsseptum von Dorsal- und Ventralkanal der Arme und Pinnulae. Der Genitalstrang und die beiden umgebenden Rohre sind gewöhnlich in den Armen sehr dünn und schwellen durch reife Geschlechtsprodukte erst in den proximalen Pinnulateilen so stark an, daß der Genitalkanal fast ganz angefüllt, Dorsal- und Ventralkanal aber als kleine Räume nach oben und unten gedrängt werden. Bei Actinometra parvicirra reichen die „Gonaden" bis in die Arme, auch bei Isocrinus decorum und Holopus reifen die Eier und Samenzellen in den Armen, bei Actinometra pulchella und gelegentlich bei Antedon rosacea (♀) sogar in der Kelchdecke. Der Austritt der Geschlechtsprodukte erfolgt an der dem Arm zugekehrten distalen Seite der Pinnulae durch sich während der Geschlechtsperiode bildende Oeffnungen (♂) oder durch Ruptur besonders disponierter umwulsteter Stellen (♀). Die Eier treten bei Antedon erst aus, nachdem Sperma ins Wasser abgegeben worden ist, werden befruchtet und bleiben etwa 5 Tage lang unweit von den Austrittsstellen an den Pinnulae hängen, wo sie mit ihrer feinstacheligen Hülle durch das Sekret besonderer Drüsen angeklebt werden (Reichensperger). Dann wird die Larve mit 5 Wimperringen frei. Bei Antedon hirsuta entwickeln sich die Eier in einem durch Einstülpung von außen her entstehenden Brutraum neben den Ovarien in den Pinnulae, die Pentacrinusstadien sitzen bei dieser Art wie auch bei Antedon (Hathrometra) prolixa auf den Cirren.

Aus den Armen tritt der Genitalstrang samt seinen begleitenden Kanälen in den oralen Teil der Scheibe, verbindet sich dort mit seinen 5 Genossen durch ein System verzweigter und von Lakunen begleiteter Stränge, die bei der Larve frühzeitig angelegt werden und die Armstränge aussenden. Die Verbindung dieser Stränge mit dem Axialstrang ist zweifelhaft, doch steigt an einer Seite von der Basis des Axialorganes ein Zellenkomplex oralwärts, der sich oben an den oralen Blutgefäßring anlegt, durch zahlreiche Gefäße mit dem labialen Blutplexus verbunden ist und durch diesen auch mit den genitalen Blutlakunen in Verbindung steht. Er entspricht vielleicht der von Russo beobachteten axialen Gonade und enthält ohne Zweifel Geschlechtszellen (?). Eine wie bei Holothurien im m. p. I. bei der Larve angelegte Gonade wird später rückgebildet.

Schizocölraume und Blutgefäßsystem. Unterhalb des Nervenepithels der Nahrungsfurchen findet sich überall ein kleiner Schizocölkanal, der von den Armen in die Scheibe eintritt und hier ein den Mund umgebendes Ringgefäß bildet. Ob dieses Kanalsystem aus eigentlichen Blutgefäßen besteht, ist zweifelhaft, vielleicht stellt es nur ein Hohlraumsystem dar, das Nerv und Wassergefäß trennt und bei den Kontraktionen und Volumänderungen der Ambulakralkanäle von Nutzen ist. Echte blutführende Gefäße stellen die schon besprochenen Genitallakunen der Pinnulae, Arme und Mundscheibe dar. Außerdem findet ein reicher Austausch von Wanderzellen und „Blut"-Flüssigkeit durch Spalträume in den epithelumkleideten Bindegewebsbalken des Kelches statt. Der Komplex dieser Gefäße weist zwischen Darm und Axialorgan konzentriertere Partien auf, von denen ein den Oesophagus umgebender „Labialplexus" (schwammiges Organ, Lymphdrüse?) besonders auffällt. Man sollte ihn zum Unterschied von dem Schizocölring, der oberflächlichen Ringlakune, als tieferliegenden oder ösophagealen Ringplexus unterscheiden. Die Blutgefäße des Kelches stehen mit den Bindegewebsschichten von Darm und Axialorgan in enger Verbindung und stellen offenbar wichtige Transportgefäße für Wanderzellen und Nahrungsmaterial her. Doch ist nicht ausgeschlossen, daß auch die großen cölomatischen Kanäle und Sinus eine Rolle bei der Stoffzu- und -abfuhr spielen.

Dorsal-Axialorgan. Innerhalb des zentralen Hohlraums, der von den 5 Kanälen des gekammerten Organs im Stiel eingeschlossen liegt, verläuft ein von einer Schicht relativ dicker Zellen gebildeter Kanal mit ganz engem Lumen, der sich nach oben bis in den Kelch fortsetzt, mehrschichtig wird, zahlreiche sekundäre blind endende Kanäle abgibt und sich endlich zu einem nach oben offenen Sacke öffnet, der an einer Seite durch einen angelagerten Urgeschlechtszellenkomplex vervollständigt wird und ungefähr bis in Höhe des tieferliegenden Blutringplexus reicht, von wo er nach seinem trichterförmigen Lumen hin besonders viele Gefäße bekommt.

Bei der Larve wird das Dorsalorgan nach Seeliger in der Nähe des gekammerten Organs vom linken Blatt des Vertikalmesenteriums (des rechten Cöloms) als eine ins Mesenchym gelangende Anschwellung angelegt, die sich bald in eine äußere Hülle und eine innere Zellmasse sondert. Diese Anlage wuchert dann in den Stiel und bis unter die Mundscheibe.

Sacculae. Bei Antedon, Promachocrinus, Eudiocrinusarten, Atelecrinus, Bathycrinus, Rhizocrinus und Isocrinus (nicht aber bei Actinometra, von der allerdings ähnlich angeordnete „blasige Zellkomplexe" [Hamann, Reichensperger] bekannt sind, Holopus, Metacrinus, 2 Arten von Eudiocrinus) finden sich ab und zu im Bindegewebe des Kelches und des Analtubus, viel häufiger und regelmäßiger aber zwischen den Tentakeln an der Seite der Nahrungsfurchen in ihrem ganzen Verlauf eigentümliche runde Körper. Sie liegen dicht unter dem Epithel im Bindegewebe, sind im Leben farblos, während sie bei toten Tieren lebhaft Farbstoffe aufnehmen. Im Innern sind sie mit stark lichtbrechenden eiweißartigen Kugeln gefüllt, die in traubenförmigen Massen zusammenliegen und mit einem Fortsatz an der Außenwand angeheftet zu sein scheinen. Die Sacculae entstehen aus Mesenchymzellen, die nach außen von einer Lage Bindegewebszellen abgeschlossen werden und sich in dieser Kapsel lebhaft vermehren, wobei ein äußeres Epithel von zentralen

Zellen unterscheidbar wird. Aus jeder der letzteren sollte eine der lichtbrechenden und später zusammentretenden kleinen Kugeln hervorgehen (Seeliger). Nach Cuénot ist die ganze Traube das Produkt einer Zelle. Die Kugeln sind interzelluläre Sekretprodukte und bleiben in ihrer Zelle bis die Sacculawand sich nach außen (oder ins Darmlumen) öffnet und die ganzen Zellsäcke mit ihren Einschlüssen austreten. Die Sacculae scheinen demnach Exkretionsorgane (Perrier, Ludwig, Chadwick, Reichensperger) zu sein und keine Reservestoffe zu enthalten.

b) Systematik. Miller benutzte die Beweglichkeit oder Unbeweglichkeit der Kelchplatten systematisch und unterschied danach: Articulata (Pentacrinus usw.), Semiarticulata (Poteriocrinus), Inarticulata (Cyathocrinus usw.) und Coadunata (Eugeniacrinus), die Ankylose der unteren Kelchplatten mit dem Proximale zeigen. Joh. Müller stellte die von Miller nicht berücksichtigten Antedonidae in die Articulata, bildete die Gruppen Costata (für Saccocoma) und Testacea (für Haplocrinus) und stellte die meisten übrigen Formen in die „Tesselata" (mit Marsupites), bei denen neben der Täfelung des Kelches die solide Beschaffenheit des Tegmen systematisch verwertet wurde. Zittel brachte die Müllerschen Testacea sowie den von Müller ganz ausgesonderten Holopus in die Articulata. Wachsmuth unterschied Stomatocrinoidea (= Neocrinoidea P. H. Carpenter) und Palaeocrinoidea, von denen die letzteren, die ungefähr den Tesselaten entsprachen, ein doppeltes Munddach haben sollten. Nach der Regelmäßigkeit des poralen Interradius bildeten Carpenter und Etheridge die entsprechenden Gruppen der Regularia und Irregularia. Dann folgte die Wachsmuth-Springersche Einteilung in: Cameraten (mit festem Tegmen und inkorporierten Armbasen), Articulaten (Ichthyocrinidae, mit weichem Tegmen, mit oder ohne Arminkorporation) und Inadunata (mit ganz freien Armen). Die Inadunaten zerfallen in die Larviformia (mit nur 5 großen Oralia im Tegmen und subtegminalen Ambulakralfurchen) und Fistulata mit suprategminalen Nahrungsfurchen und aufgetriebener Mundscheibe (vault). P. H. Carpenter stellte die neozoischen Crinoiden zu den Articulaten (Wachsmuth und Springer) als „Pinnata", denen dann die Ichthyocriniden als zweite Untergruppe Impinnata (d. h. ohne Pinnulae) gegenüberstehen.

Einen neuen Weg beschritt Jaeckel, indem er die den Cameraten ungefähr entsprechenden, den Cystoideen verwandten Cladoidea (mit zahlreichen, echte „Pinnulae" [im Sinne Jaeckels] tragenden Armen und entsprechend vielen tragenden Kelchplattenreihen [Costalia]) von den echten Crinoiden, die 5 Arme und Radialiareihen, sowie Ramuli statt der Pinnulae und mit dem r. p. R. verbundene Analplatten haben, unterschied. Sie zerfallen in die primitiven Fistulata (Porocrinus, Crotalocrinus, Marsupites), Larvata (etwa Larviformia, doch von Fistulaten abgeleitet), Costata (Arme mit alternierenden unverzweigten Aesten, die zum Teil zur Aufnahme von Geschlechtsprodukten dienen, mit 5 Oralia, ohne Analplatten und Tubus: Hybocrinidae, Hyocrinidae, Saccocomidae, Rhizocrinidae? usw.), Articulosa (etwa wie Wachsmuth und Springer's Articulata) und endlich die nicht mit den letzteren, sondern mit den Fistulata genetisch verbundenen Articulata (Pentacrinidae, Apiocrinidae, Eugeniacrinidae, Antedonidae usw.).

Ich folge bei der Charakteristik und Anordnung der rezenten Gruppen der Systematik von Bather, deren Hauptscheidung auf das Fehlen oder (ursprüngliche) Vorhandensein von Infrabasalia gegründet wird. Die pseudomonozyklischen Formen, die von Steinmann als Cryptocyclica zusammengestellt werden (neben die Mono- und Dicyclica), sind dabei als dizyklisch zu rechnen. Es wird dabei angenommen, daß die Entwickelung eines soliden Tegmen (bei den „Cameraten"), die Inkorporierung der Armbasen, wie die Ausbildung von Biserialität und von Pinnulae zwei- oder mehrmals unabhängig stattfanden.[1])

Crinoidea Miller 1821.

A. Unterklasse. Monocyclica Bather 1899. Kelchbasis ohne IBB, die 5 Fortsätze des gekammerten Organs liegen interradial. Die neuen Columnalia werden am äußersten oberen Stammende angesetzt.

1. Ordnung. Monocyclica Inadunata. Kelch besteht nur aus B und R, zu denen höchstens noch Analia kommen. Amb und Iamb bleiben, wenn sie im Tegmen auftreten, suprategminal und werden nicht fest verbunden (im Gegensatz zu Adunaten und Cameraten).

Einzige rezente Familie: Hyocrinidae. 3B, das einzige nur 2R anliegende, im l. p. I.; 5 dünne spatelförmige R. 5 Arme mit alternierenden Ramuli, die alle in der Höhe der Armspitzen enden und von denen die 3 bis 4 ersten in ihren basalen Teilen die Gonaden tragen. 5 bis 6 IBr, je ein Paar syzygial verbunden, IIBr und folgende gewöhnlich 3 mit 2 Syzygien. Erster Seitenast immer links (bei Betrachtung in situ), Tegmen mit 5 dreieckigen O und peripheren Sekundärplättchen. Jedes O mit einem, das m. p. O mit 2 Porenkanälen. Ferner in jedem I. außer im m. p. weitere Poren in iAmb. Oder auf dem O des m. p. I. ein Porus, und in den übrigen I. nur Poren (3 bis 5) auf dem iAmb. Kurzes Analrohr links im m. p. I. Stiel ohne Cirren, seine Glieder vielleicht aus je 2 Stücken zusammengesetzt. Arme jederseits mit Doppelreihen von Amb und Adamb (letztere besonders bei den Gonaden). Zwischen den O, die sich vielleicht öffnen konnten, der Mund (ebenso wie der Anfangsdarm mit Drüsenwülsten). Darm mit einfacher Rechtswindung. Kelchgewebe ohne Spicula.

Hyocrinus bethellianus (W. Thomson) ist der einzige lebende Vertreter der Monocyclica. Crozetinseln, Enderbyland, abyssal. Kelch etwa 7, Krone mit Armen 60 mm lang oder mehr.

B. Unterklasse. Dicyclica Bather 1899. Kelchbasis mit Infrabasalia, die atrophieren können und oft verborgen oder mit dem Proximale verschmolzen sind. Die 5 aboralen Fortsätze des gekammerten Organs liegen immer radial. Neue Stielglieder werden nicht immer am obersten Stammende eingefügt.

1. Ordnung. Dicyclica Inadunata

[1]) Auf A. H. Clark's neue Systematik der rezenten Crinoiden (1912) kann hier nur hingewiesen werden. Korrektur-Anmerkung.

Bather. Dorsaler Kelch ursprünglich von der einfachen Patina gebildet. Höchstens werden Analia zwischen die Kelchplatten aufgenommen. Inkorporierung von Br kommt mit oder ohne IBr vor, ist aber niemals eine starre, auch bleiben die entsprechenden Amb suprategminal. Neubildung der Columnalia am äußersten Stammende.

Unterordnung. Dendrocrinoidea. Radialfacetten oft recht groß, so daß sich die Arme nicht scharf vom Kelch absetzen. Die oft unregelmäßige Dichotomie der Arme führt zu Pinnulierung hinüber. Tegmen dünn und biegsam mit unauffälligen und bei alten Tieren zuweilen ganz geschwundenen Oralia. Ohne Madreporit. Oft ein großes Analrohr, das als Ventralsack fast die ganze Mundscheibe einnehmen kann. Bei den für uns allein in Frage kommenden jüngeren Articulata treten die Armbasen in Verbindung.

1. Familie. Pentacrinidae. Die ein- oder mehrmals, regelmäßig oder unregelmäßig verzweigten Arme sind uniserial und tragen Pinnulae. Das biegsame Tegmen dehnt sich etwas zwischen die Arme aus, so daß die IBr oder mehr los inkorporiert sein können. Analplatten fehlen, doch ist ein kleines Analrohr vorhanden. Die IB sind klein, verborgen oder geschwunden (pseudomonozyklisch, kryptozyklisch). Der mehr oder weniger fünfkantige Stiel trägt Cirren in Kränzen zu je 5 an den Epizygalien von Stammsyzygien. Leben meist in Kolonien, in denen die älteren Stielteile ein dem Boden aufliegendes dichtes Geflecht bilden, von dem die jüngeren Enden sich erheben. Scheinen sich loslösen und mit basalen Cirrenkränzen befestigen zu können. Hypalocrinus, Isocrinus (Pentacrinus), Metacrinus, Teliocrinus, Cenocrinus, Diplocrinus.

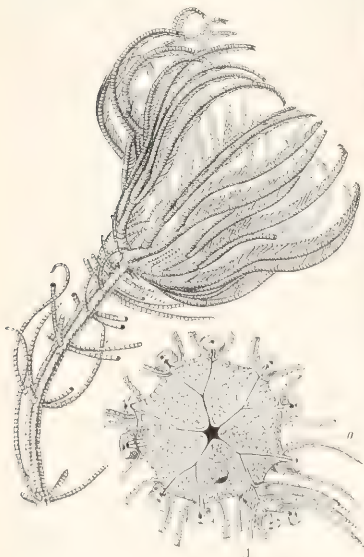


Fig. 24. Isocrinus asteria (Pentacrinus caput medusae). Auf dem Bild des Tegmens bedeutet O den Mund, A den After. Nach Johannes Müller aus Claus-Grobben.

2. Ordnung. Flexibilia Zittel (= Articulata Wachsmuth und Springer). Proximale Br durch kleinplattige Haut, iBr oder durch direkte Aneinanderlagerung lose inkorporiert. Zwischen den R können Platten auftreten. Die oft verborgenen oder geschwundenen IBB verschmelzen vielfach mit dem obersten Columnale, das als „Proximale" diese Stelle beibehält. Tegmen biegsam, mit offenem Mund, suprategminalen Nahrungsfurchen, deutlichen Amb und zahlreichen kleinen iAmb. Arme uniserial. Die geologisch jüngere

Gruppe. Pinnata mit Pinnulae und einfach oder isotomisch verzweigten Armen. B und R durch enge Sutur verbunden. IBr_2 (selten IBr_1) ist das Iax. Bei den alten Tieren keine Analia im Kelch. Die proximalen Columnalia des runden, pentagonal-elliptischen Stieles bilden oft einen breiteren Conus.

1. Familie. Apiocrinidae. 5 B und 5 R deutlich, Br mehr oder weniger weit inkorporiert, iBr können vorhanden sein. Columnalia des cirrenlosen und eventuell mit inkrustierendem Wurzelende versehenen Stieles mit rundem oder pentagonalem Querschnitt mit radiären Streifen. Calamocrinus; mit Armbasen, die etwas schmaler sind als die R, von denen das r. und l. p. etwas länger sind als die übrigen. Jeder Arm gibt auf einer Seite 2, auf der anderen 3 dicke unverzweigte Aeste ab. Inkorporierung durch kleine iBr und porentragende iAmb. Die ersten Pinnulae von der tegminalen Furche ausgehend. Deutliche Amb und Adamb auf Armen und Tegmen.

2. Familie. Bourgueticrinidae. Arme kaum und jedenfalls ohne iBr inkorporiert. Die Stammglieder, die sich durch Abgliederung vom obersten Proximale zu bilden scheinen (Döderlein), mit dicken elliptischen Gelenkflächen mit Gelenklängswülsten, deren Ebene an dem oberen Ende gegen das untere gedreht ist. Die älteren Stielglieder scheinen aus 2 verwachsenen Syzygialgliedern zu bestehen. Meist verzweigte Wurzelcirren am Stielende. Sacculae vorhanden. Basalia meist eng verwachsen, doch können die Grenzen sichtbar gemacht werden.

Rhizocrinus und Bathycrinus, letztere Gattung kann die Armkrone mitsamt den Radialia abwerfen. Bei ersterer bleiben dabei die R und IBr_1 am Kelch.

3. Familie. Antedonidae. Die rezenten Antedoniden entbehren im fertigen Zustande des Stieles, von dem nur das alleroberste Ende mit den IB verschmilzt und so in dem cirrentragenden Zentrodorsale erhalten bleibt. Die B sind außerordentlich klein und als „Rosette" nach innen gerückt. Geringe, schwache Inkorporierung der dünnen, zuweilen der Amb entbehrenden Arme. Embryonal werden 5 Oralia und ein Anale angelegt, die bald verschwinden. Mund endozyklisch. Zahlreiche Sacculae. Antedon mit sehr vielen Arten. Eudiocrinus mit unverzweigten Armen. Hier schließen sich wohl die (durch diskontinuierliche Variation entstandenen Decametrocrinidae an, die 5B oder 10R mit 10 einfachen (Decametrocrinus) oder zweige-

teilten (Promachocrinus) Armen besitzen. Mit Sacculi. Mund zentral.

4. Familie. Atelecrinidae. Die Basalia bilden keine Rosette, sondern einen Basalstrang. Arme zeigen eine Gabelung. IIBr lang, die ersten 8 oder 16 ohne Pinnulae. Ohne Stiel, Zentrodorsale mit alternierenden Cirren in 5 senkrechten Doppelreihen. Sacculi vorhanden. Atelecrinus.

5. Familie. Actinometridae. Ohne Stiel und mit scheibenförmigem Centrodorsale mit wenigen, zuweilen rudimentären Cirren am Rand. Kelchhöhle geräumiger als bei den vorhergehenden, enthält den vielfach gewundenen Darm, dessen Mund exozyklisch liegt. Tegminale Nahrungsfurchen daher verschoben, asymmetrisch und verschieden. Amb. fehlen. Einigep. Armäste können kleiner sein und der Nahrungsfurche und der Ambulakralpapillen entbehren. Proximalste Pinnulae mit gesägtem Rand. Sacculae fehlen. Actinometra mit zahlreichen Arten.

6. Familie. Thaumatocrinidae. Ohne Stiel, aber sehr abweichend gebaut. Die unverzweigten Arme nicht inkorporiert, ohne Amb. Tegmen mit 5 Oralia und großen iAmb. Analrohr im m. p. I. Eine Reihe von 5 Platten schiebt sich hier basal bis auf den Ring der verschmolzenen Basalia. Auch die übrigen R werden durch interradiale, den B aufsitzende Platten getrennt. Sacculae fehlen.

Thaumatocrinus, nur ein Individuum aus der Südsee bekannt.

7. Familie. Holopodidae. Ohne Stiel, aber mit dem Kelchende aufsitzend, in flachem Wasser. Die Patina besteht aus verschmolzenen R, die die B überwachsen und verdrängt zu haben scheinen. IBr_1 und Iax beim adulten Tier verschmolzen. Die Rami der Arme dick, unverzweigt und eingekrümmt. Es sind große Oralia vorhanden. Darum wenige iAmb. Sacculi fehlen. Holopus.

II. Eleutherozoa.

Die Eleutherozoen sind freibewegliche, stiellose Echinodermen, deren After meist am apikalen Körperende liegt. Der Mund ist oft dem Boden zugewendet, in anderen Fällen kriechen die Tiere mit einer Seite auf dem Boden, wobei die oro-apikale Achse horizontal liegt. Die Nahrung wird direkt vom Munde aufgenommen. Die Nahrungsfurchen (Ambulacralfurchen) haben ihre nutritorische Funktion verloren und sind meist zu Epineuralkanälen geschlossen. Neben sensorischen und respiratorischen Anhängen des Wassergefäßsystems kommen lokomotorische Fortsätze, nämlich echte, meist mit Saugscheibe versehene Füßchen vor. Damit hängt weiter das Auftreten von ambulakralen Stauungsreservoiren, den Ampullen und Polischen Blasen, zusammen. Von den 3 Nervensystemen ist das apikale Nervensystem rudimentär, während das ambulakrale oder orale die größte Entwickelung aufweist. Ebenso tritt das bei Pelmatozoen überwiegende apikale Skelett hier zugunsten einer dominierenden Ausbildung oraler bezw. ambulakraler Skeletteile zurück. Die Geschlechtsorgane öffnen sich interradial am Körper (oder der Basis der Arme).

1. Holothurioidea (Seewalzen). a) Allgemeines. Die Holothurien sind freibewegliche Echinodermen (Eleutherozoen), deren Körper in oro-apikaler Richtung zur Gestalt einer Gurke, eines Brotes oder eines Wurmes ausgezogen ist und ungefähr an seinem vorderen Ende den Mund, am Hinterende den nie fehlenden After trägt. Die Ambulakren dehnen sich in geraden Streifen vom Mund bis sehr nahe zum After aus, ein Verhalten, das an die Reduktion der Apikalseite bei Seeigeln erinnert. Sie sind meist mit normalen Füßchen besetzt, welche Ampullen mit einfacher Zuleitung und eine Saugscheibe aufweisen; sie können auch zum Teil als scheibenlose Tastfüßchen ausgebildet sein und in ihrer Verbreitung auf die Interradien ausgedehnt werden. Die vordersten 10 bis 30 Füßchen sind als große Mundfüßchen oder Fühler („Tentakel“) ausgebildet, die immer vorhanden sind und durch ihre verschiedene Form (schildförmig bei Aspidochiroten; baumförmig bei Dendrochiroten, fingerförmig oder gefiedert bei Paractinopoden) wichtige Merkmale für die Einteilung der Gruppe geben. Die Fühler reiten gewöhnlich auf den Treffpunkten von 10 oder mehr ursprünglich bisquitförmigen Kalkstücken; diese bilden zusammen einen Kalkring, der in einem in die Leibeshöhle vorspringenden Ringwulst der Körperwand (am Rande des Mundfeldes) gebildet wird. Die Kalkringglieder werden in Interradialstücke und die selten allein vorhandenen (Elpidiiden) 5 Radialstücke eingeteilt, über letztere laufen die Radiärnervenstämme und die bei den körperfüßchenlosen Paractinopoden rückgebildeten Radiärkanäle nach hinten, wo sie ohne deutlichen Endtentakel endigen. Im übrigen ist das Skelett nur schwach entwickelt, kann sogar bis auf den Kalkring (Rhabdomolgus, Kolostoneura) oder vollständig (Pelagothuria) fehlen. Es wird durch zahlreiche kleine maschige Kalkkörper der Cutis oder sonstigen Bindegewebes repräsentiert, die von einer ursprünglichen apikalen oder ambulakralen Ordnung nichts mehr erkennen lassen und in ihrer höchst mannigfaltigen, systematisch wichtigen Form als Schutz-, Stütz- oder Fortbewegungsapparate speziellen Bedürfnissen aufs feinste angepaßt sind. Die Körperwand bleibt daher meist lederartig und Bewegungen zugänglich, für deren Ausführung eine zuweilen (Paractinopoden) zu einer Ringmuscularis geschlossene Quermuskulatur der Interradien und 5 große, in die Leibeshöhle vorspringende radiale Längsmuskeln vom Cölomepithel der Körperwand gebildet werden. Offene Ambulakralfurchen sind nicht vorhanden, das epineurale Nervensystem ist in die Tiefe verlagert

und zeigt über seinem Ring und seinen Radiärstämmen mehr oder weniger deutliche Epineuralkanäle (schizocölischen Ursprungs). Hyponeuralnervenstränge und (schizocölische) Hyponeuralkanäle sind nur in den Radien vorhanden. Der orale Ringsinus wird wahrscheinlich durch einen vom linken Cölom abstammenden Peripharyngealraum oder Schlundsinus repräsentiert, der zwischen Schlund und Kalkring liegt und durch seine Einschiebung zwischen Nervenring und Ringkanal den letzteren mitsamt seiner Lakune nach hinten (apikalwärts) drängt. Ein apikales Nervensystem fehlt.

Der Darm zeigt eine sehr deutliche Rechtsdrehung. Er ist in seinem ganzen Verlauf durch ein großes Mesenterium aufgehängt, das zunächst im mittleren poralen („dorsalen") Interradius, dann im linken poralen („dorsalen") und schließlich im rechten antiporalen („ventralen") Interradius läuft. Wenn wie gewöhnlich der Darm länger als der Körper ist, so läuft er erst nach hinten, dann im linken poralen Interradius nach vorn und im r. a. I. wieder nach hinten, so daß zwei „absteigende" und ein „aufsteigender" Darmschenkel unterschieden werden können. Der Darm wird fast auf seinem ganzen Verlauf von einer großen „mesenterialen" Blutlakune an der linken Seite des Mesenteriums und von einer ebenso kräftigen antimesenterialen Lakune (die vorn in die Ringlakune mündet) begleitet.

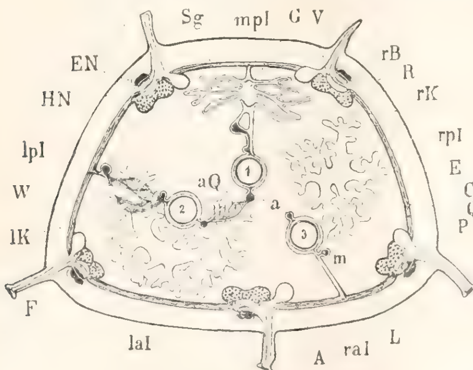


Fig. 25. Querschnitt durch die Mitte einer Holothurie. Schema. Vom Apikalende gesehen. m p I, r p I, r a I, l a I, l p I die 5 Interradien, l linker, r rechter, m mittlerer, p poraler, a antiporaler, F Füßchen, E Epidermis, C Cutis, Q Quermuskelschicht, P Peritonealepithel, EN Epineuralkanal und -nerv, HN Hyponeuralkanal und -nerv, rB radiäre Blutlakune, R Radiarkanal, A Ampulle, V Fußchenventil, L Langs-Radiarmuskel, G Genitalbasis, Sg Sinus genitalis, 1, 2, 3 die 3 Darmschenkel, m mesenteriale, a antimesenteriale Darmblutlakune, aQ antimesenteriales Quergefäß, W dorsales Wandernetz. Original.

Von der der Atmung dienenden Kloake kann sich (außer bei den meisten Elasipoden und Paractinopoden) ein Blindsack entwickeln, der sich gewöhnlich in zwei baumförmig verzweigte „Kiemenbäume" oder „Wasserlungen" gabelt, die die freien Interradien einnehmen und mit dem Darmblutgefäßsystem in Beziehung treten können. Ihre basalsten Aeste können bei einigen Formen zu besonderen Verteidigungsmittteln, den Cuvierschen Schläuchen, umgebildet sein.

Der Ringkanal besitzt eine (oft linke ventrale) oder zahlreiche, vorzugsweise linksstehende Polische Blasen sowie einen Steinkanal, der die Rückenseite des Tieres bestimmt. Der aus dem vorderen Enterocöl entstehende Axialsinus wird zur Madreporenblase, einer Anschwellung des Steinkanals, aus der gewöhnlich Poren in die Leibeshöhle durchbrechen, während der nach außen führende primäre Porenkanal (außer bei einigen Elasipoden und Synaptiden sowie Pelagothuria) verloren geht. Zuweilen sind sekundäre, in die Leibeshöhle sich öffnende Steinkanäle vorhanden. Der Aboral- oder Genitalsinus bleibt mit seiner Lakune als „problematischer Kanal" auf das vom Oralsinus allein gebildete Steinkanalmesenterium beschränkt. Auch das Genitalsystem wird nicht fünfstrahlig, sondern bleibt im Interradius des Steinkanals und bildet auf einer oder beiden Seiten des m. p. Mesenteriums einen Schlauch oder ein Bündel von Schläuchen, die in die Leibeshöhle vorspringen und in einer Genitalbasis zusammenlaufen. Von hier zieht ein Ausführungsgang zur Haut, um auf dem Rücken, auf einer Papille oder auf der Spitze eines Fühlers nach außen zu münden. Bei den Paractinopoden findet sich häufig Zwittrigkeit.

Da die Tiere auf dem Boden kriechen, im Schlamm graben usw., so liegt die Längsachse des Tieres im allgemeinen dem Boden parallel, dem gewöhnlich drei bestimmte, nämlich dem Steinkanal gegenüberliegende Radien zugekehrt werden. Dadurch entsteht eine oft abgeflachte, mit Saugfüßchen versehene Bauchseite (das Trivium), das von der nur mit zwei Radien versehenen Rückenseite (dem Bi-

vium), die vielfach nur sensorische saugscheibenlose Füßchen trägt, mehr oder weniger scharf abgesetzt ist. Die sekundäre Bilateralsymmetrie, die sich darin ausprägt, weist dieselbe Symmetrieebene auf wie die primäre Zweiseitigkeit, die durch die Lage des Steinkanals bestimmt wird und in den Geschlechtsorganen und anderem zum Ausdruck kommt. Die Ausdrücke Bauch und Rücken decken sich bei den auf einer Seite liegenden Holothurien nicht mit Oralseite und Apikalseite und müssen daher mit Vorsicht angewendet werden.

Haut und Körperwand. Die Haut ist gewöhnlich lederartig, seltener dünn (manche Paractinopoden) oder fest gepanzert (Psolusarten, Sphaerothuria). Das äußere, mehr oder weniger hohe Epithel besitzt eine dünne Cuticula und enthält gewöhnliche Stützzellen, Sinneszellen, sowie becher- und schlauchförmige Drüsen. Letztere können an den Tentakeln (als Klebdrüsen) und in besonderen Sinnesorganen, den Tastpapillen der Paractinopoden (als Giftdrüsen?), besonders angehäuft sein. Die oft ganz außerordentlich dicke Cutis besteht aus typischem Bindegewebe mit Grundsubstanz, stern- und spindelförmigen Zellen und Fasern, sie läßt oft eine dichtere innere und eine lockere äußere Schicht erkennen. Sie enthält einen subepideromidalen Nervenplexus und zeigt an ihrer Innengrenze eine zweite nervenführende Zone und etwas außen von letzterer ein leicht gelockertes lakunäres Gebiet, in dem besonders viele Wanderzellen vorkommen. Auf das Bindegewebe folgt in den Interradien die Quermuskelschicht, deren Matrix das darunter folgende Cölomepithel ist. Die Quermuskelschicht ist in den Radien unterbrochen, weil sich hier die großen radiären Organe, speziell der Radialkanal, trennend in den Wege schieben. Bei fehlendem Radiärkanal (Paractinopoden) zieht die Quermuskulatur auch hier durch und ergänzt sich zu einer Ringmuskulatur (bei Acanthotrochus mirabilis nur am Vorder- und Hinterende). Kontraktion der Körperwand führt durch den auf den Leibesinhalt ausgeübten Druck zu Verlängerung des Körpers. In den Radien pflegt die Körperwand etwas dicker zu sein. Hier treffen wir von außen nach innen nach der Bindegewebslage auf den Hyponeuralspalt, dann den zugehörigen epineuralen Radiärnerv, weiter auf eine äußerst dünne, aber Zellen aufweisende Membran, die ihn von dem eng angeschmiegten hyponeuralen oder inneren radialen Nervenband trennt. Dann weiter auf einen mehr oder weniger deutlichen Sinus, den Hyponeuralspalt. Nun folgt eine dünne Zone lakunären Bindegewebes, die radiäre Blutlakune, unter welcher bei den meisten Holothurien der an seiner Außenseite eine Lage äußerer Radiärmuskelfasern aufweisende Radiärkanal, bei den Paractinopoden aber (abgesehen von Radiärkanalresten) die Ringmuscularis folgt. Endlich kommt mit dem darüber hinziehenden Leibeshöhlenepithel in das Cölom vorspringend der kräftige Radiärmuskel, der schon eine Bildung des Leibeshöhlenepithels darstellt. Der Längsmuskel ist gewöhnlich genau in der radialen Mittellinie etwas schmaler als links und rechts davon, wo die Hauptmasse der Fasern verläuft. Bei den Paractinopoden, Elasipoden, Synallactiden und Dendrochiroten bleiben die Radiärmuskeln gewöhnlich einfach, oder es bleibt bei der Andeutung eines medianen Spaltes. Dagegen finden wir bei den typischen Molpadiiden und Aspidochiroten die Teilung in zwei parallele adradiale Längsbündel gewöhnlich deutlich durchgeführt. Am vorderen Körperende setzen sich die Radiärmuskeln an die Radialstücke des Kalkringes (dicht unter dem Radialkanal) an und gewinnen damit einen festen Angriffspunkt für das Zurückziehen des besonders gefährdeten und besonders wichtigen Vorderteiles mit den Tentakeln. Wenn die letzteren sich zusammenziehen und dicht zusammengedrängt auf dem Periostom liegen und nun die Muskulatur anzieht, so kann bei vielen Holothurien der ganze Vorderteil des Tieres, der bis zu einer gewissen Region hinter den Fühlern weichhäutiger zu sein pflegt, eingezogen werden, wobei die Fühler in die röhrenförmig eingestülpte Mundscheibe zu liegen kommen. Bei den Formen mit einstülpbarem „Schlundkopf" hat der Körper hinter dem Tentakelkranz einen größeren Durchmesser als dieser und der Kalkring, so daß die Längsmuskeln in ihrem Vorderteile bei der Retraktion blatt- (Theelia cataphracta; Phyllophorus perspicillum) oder röhrenförmig ins Körperinnere zur Verkürzung des Weges ausgezogen werden. Dies führt bei einigen Synaptiden und Molpadiiden zu mehr oder weniger unvollkommener, bei den Cucumariiden aber meist (nicht bei Theelia cataphracta und Phyllophorus perspicillum) zu vollständiger Abtrennung besonderer Rückziehmuskeln, die ungefähr von der Hintergrenze des vorderen Körperdrittels direkt zu dem Kalkring ziehen, während ihr Stamm, der alte Radiärmuskel, den Umweg an der Körperfläche entlang macht und dort mit dem abgegliederten (zuweilen geteilten) Retraktormuskel wieder ganz oder nahezu zusammentrifft. Die Retraktoren scheinen sich in den erwähnten drei Gruppen selbständig gebildet zu haben. Während die Radiärmuskeln nach dem hinteren Körperende allmählich verstreichen, schwillt die Quermuskelschicht dort stärker an und bildet einen Sphincter für den After. — Bei vielen Paractinopoden bildet das Cölomepithel hinter dem Ringwulst, in dem der Kalkring entsteht, und an der Außenwand desselben zahlreiche kleine Einstülpungen in das Cölomepithel, die von Bindegewebe ausgefüllt und von der Ringmuscularis aus radiär von Muskelfasern durchzogen werden, die eine Kontraktion dieser pulsierenden Peritonealsäckchen bewirken (Becher).

Skelett. Vom Kalkring scheinen zuerst die 5 Radialstücke, erst etwas später 5 interradiale Stücke angelegt zu werden. Bei den Elpidiiden finden sich zeitlebens nur 5 Radialstücke, und bei Psychropotiden sind die Interradialia durch Kalkgranulationen ersetzt, doch ist fraglich, ob diese Verhältnisse so ursprünglich sind, denn auch sonst sind die Interradialia oft kleiner und bei Phyllophorus chilensis, Cucumaria japonica und Trochostoma arenicola sicher sekundär verloren gegangen. Vollständiges Fehlen des Kalkringes wird von ein paar Cucumariiden angegeben und ist für Pelagothuria sicher festgestellt, bei dieser pelagischen Form aber auch leicht begreiflich. Bei Synaptiden kann die Zahl der Interradialglieder des Kalk-

ringes vermehrt werden, wobei sie im allgemeinen mit einer vermehrten Fühlerzahl Schritt hält, zuweilen aber davon überholt (Synapta kallipeplos, Myriotrochus und Acanthotrochus mit 24 bezw. 12 und 12 Fühlern gegenüber 10 Kalkringstücken) zu werden oder ihr vorauszueilen scheint (Chiridota incongrua und liberata mit 16 bezw. 12 Fühlern bei 18 resp. 15 Kalkringgliedern). Die Vermehrung scheint durch Auswachsen abgegliederter Teile der alten Stücke zu erfolgen. Die Kalkringstücke werden als feinste querliegende Kalkstäbchen angelegt, die sich am Ende gabeln, immer mehr verzweigen und meist durch Ansetzung von maschigem Kalkgewebe nach allen Richtungen wachsen. Bei Elpidiiden bestehen sie aus einem kleinen Körper, von dessen Enden mehr oder weniger divergierende getrennte Stäbe ausgehen. Im einfachsten Falle hat sonst jedes Kalkringglied die Gestalt eines an seinen Enden verdickten Stäbchens (Rhabdomolgus ruber und Leptosynapta minuta Becher), wodurch sowohl Vorder- als auch Hinterrand des Kalkringes Einbuchtungen bekommen, die der Mitte der Glieder entsprechen. Am Vorderrande geht diese Einbuchtung fast immer verloren und wird umgekehrt durch ein Vorragen der Mitte ersetzt, so daß die Einbuchtungen nun alternierend zu den Kalkringgliedern liegen und Sättel für die auf den Trennungsstellen der Glieder aufsitzenden Fühler bilden. Am Gipfel der mittleren Vorragung liegt bei den Radialstücken ein Einschnitt für den hier hinüberlaufenden Radiärkanal mit seiner Begleitung, ein Einschnitt, der sich bei den Synaptiden häufig (an allen oder nur an den drei ventralen: Leptosynapta digitata und agassizii) zu einem Loch schließt. Die hinteren Einbuchtungen der Kalkringglieder werden gewöhnlich stärker akzentuiert, zumal an den Radialgliedern der Molpadiiden und Cucumariiden (bei Aspidochiroten nur ausnahmsweise, Holothuria princeps und Stichopus japonicus var. typicus), wo die nach hinten vorspringenden Außenenden oft einen langen, meist in einzelne Kalkstücke abgegliederten „Gabelschwanz" bilden können. Gabelschwänze der Interradialglieder sind selten (einige Thyonearten: curvata und lechleri). Die Zergliederung der Gabelschwänze in einzelne Stücke kann sich auch auf die Kalkringglieder ausdehnen, so daß dieselben schließlich aus einer größeren Zahl von Teilstücken zusammengesetzt sein können (Phyllophorus japonicus und Thyone aurantiaca). Die Radiärsymmetrie des Kalkringes kann gestört werden entweder durch eigenartige asymmetrische Verhältnisse des Kalkringvorderendes, die bei Molpadiiden und Cucumariiden übereinstimmen, oder durch bilateralsymmetrische Züge (Ungleichheit von Bauch und Rückenseite, Zusammenrücken oder Verschmelzung der drei mittleren antiporalen Glieder) bei vielen Dendrochiroten, Verkleinerung des mittleren antiporalen (Ankyloderma jeffreysii und Haplodactyla australis usw.) oder des mittleren poralen Gliedes (Rhabdomolgus ruber), ferner durch bilateralsymmetrische Einschiebung neuer Glieder bei Synaptiden (1 in den m. p. I. bei Labidoplax buskii, 2 in die seitlichen p. I. bei 12fühlerigen Synaptiden) usw. Der Kalkring ist mit Laternenteilen oder mit den Auriculae der Seeigel homologisiert worden; beides ohne hinreichende Begründung.

Histologisch besteht der Kalkring aus dem typischen maschigen Kalkgewebe der Echinodermen, dessen Lücken von einem zusammenhängenden Syncytium gebildet werden, in dem sich Fibrillen bilden. Bei einigen Synaptiden (Synapta, Synaptula Polyplectana und zuweilen bei Opheodesoma) setzt sich der Kalkring an seinem apicalen Ende in einen aus festfaserigem Bindegewebe gebildeten „Knorpelring" fort, der ersteren an Größe und Weite übertreffen und auch Löcher aufweisen kann.

Kalkkörper. Die Kalkkörper, die sich fast überall im Bindegewebe finden können, z. B. am Darm und oft besonders reich in der bindegewebigen Umhüllung des Steinkanals oder dem füllenden Bindegewebe in den Längsmuskeln (wo man häufig kleine sogenannte Hirsekörnchen von runder, C- oder stäbchenförmiger Gestalt antrifft) erfahren ihre höchste Entwickelung in der Cutis der Körperwand. Hier entstehen sie in Syncytien mit mehr oder weniger zahlreichen Kernen und zwar vorzugsweise in der äußeren Lage der Cutis. Ihre Form ist gewöhnlich für die Gruppen und die Arten eine sehr eigentümliche, obwohl auch mehrere Fälle bekannt sind, in denen eine Art während ihrer Jugend eine durchgehende Umwandlung ihres Hautskeletts erfährt. Fast alle Holothurienkalkkörper gehen in der Entwickelung von kurzen Stäbchen aus, die sich an den Enden unter ungefähr 120 Grad gabeln (ein „Primärkreuz" bilden) und durch weitere Vergabelung und durch Zusammenstoßen der Aeste Gitterplatten mit mehr oder weniger sechseckigen Maschen bilden. Durch verschiedene Größe der Aeste, Unterbleiben des Maschenschlusses, Ausdehnung in drei Dimensionen erfährt dann dieses Schema die weitgehendsten Modifikationen, von denen nur wenige genannt werden können. Bei Cucumariiden trifft man hauptsächlich knotige Schnallen mit 4 etwas in die Länge gezogenen Maschen, von denen sich 2 und 2 andere getrennt gegenüberliegen. Sie können Fortsätze senkrecht zu der Ebene treiben usw. Bei den Holothuriiden, Synallactiden dominieren die Stühlchen, die aus einer rundlichen Gitterscheibe und 4 darauf sich erhebenden zentralen benachbarten Kalkstäbchen bestehen, welche gewöhnlich noch etagenweise Verbindungen zeigen. Durch Unterbleiben des Maschenschlusses und Verschmelzung können diese Gebilde in vierarmige Kreuze mit aufsitzendem Dorn übergehen, wie sie besonders bei Synallactiden und Psychropotiden auftreten. Aehnliche kreuzförmige Kalkkörper mit Aufsätzen, oft krummen Stäbchen und ohne Verbindung der Aeste (vgl. den Kalkring!) finden sich häufig bei Elpidiiden. Die Molpadiiden besitzen wie die Holothuriiden und Synallactiden gleichfalls häufig Stühlchen, die aber oft dreistrahlig gebaut sind und sich durch merkwürdige Umformungen in drei- oder zweihakige Anker verwandeln können, die auf Gruppen von besonderen löffelförmigen Platten aufsitzen und ihre Spitzen aus der Haut hervorstrecken, um Fremdkörper festzuhalten und eine Maskierung des Tieres herbeizuführen (Molpadia, [Ankyroderma]). Die Deimatiden zeigen vorzugsweise große regelmäßige Gitter-

platten mit nach außen zu an Größe abnehmenden Maschen. Die Synaptinae besitzen überaus charakteristische Anker, die mit denen der Molpadiiden nichts zu tun haben, sich also nicht von Stühlchen ableiten, sondern Primärkreuze mit in bestimmter Weise beschränkter Gabelung darstellen. Sie artikulieren mit dem wulstförmigen „Handhabenende" auf dem Gelenkteil einer zugehörigen Gitterplatte, wobei das Bogenende der Anker mit den etwas nach außen gerichteten Spitzen gehoben und gesenkt werden kann. Die Senkung tritt bei Spannung und Verdünnung der Haut ein und bewirkt ein Vorrücken der Epidermis durch die Ankerspitzen, was die Haut an der betreffenden Stelle kletternd macht und von den Tieren zur Fortbewegung benutzt wird. Eigentümliche Haken anderer Paractinopoden (Scoliodota, Taeniogyrus, Trochodota) wirken ähnlich. Bei den Larven der Synaptinen, ferner bei den Gattungen Chiridota, Polycheira, Taeniogyrus, Trochodota, weiter bei den Myriotrochinae sowie bei manchen Elpidiiden und Deimatiden kommen verschieden gestaltete zierliche Rädchen in der Körperwand vor. Die Rauhigkeiten, Fortsätze usw. sind bei den Kalkkörpern fast immer nach außen gewendet.

In der Wand der Füßchen und Fühler trifft man oft längliche „Stützstäbe", die sich manchmal auf die benachbarten Körperspicula in Einzelheiten ihrer Form zurückführen lassen. Die Saugscheibe der Füßchen enthält meist ein einfaches (vgl. Asteridae) rundes gitterartiges Endscheibchen; bei Aspidochiroten und Elasipoden können aber auch mehrere Plättchen in einer Saugscheibe vorhanden sein.

Bei etwa 20 Molpadiiden (außer zweien lauter Molpadiaarten) finden sich gelbliche, bräunliche oder rötliche, geschichtete rundliche Körperchen, die sich um Spicula herum bilden können und diese mit zunehmendem Alter fast ganz verdrängen. Sie bestehen zu zwei Dritteln aus $FePO_3 + 4H_2O$, einem Fünftel $Fe(OH)_3$ und nur wenig $CaCO_3$.

Nervensystem und Sinnesorgane. Das Nervensystem ist im wesentlichen durch das Fehlen eines apikalen Komplexes und durch den Mangel des Hyponeuralringes gekennzeichnet. Im einzelnen ist zu dem schon oben Gesagten noch folgendes zu beachten. Der Epineuralkanal, der vielleicht ursprünglich auf die geschlossene Epineuralfurche zurückging, hat in Wirklichkeit meist schizocölisches Aussehen. Er ist gewöhnlich über dem Ring- und den Tentakelnerven sowie besonders über den Radiärbändern festzustellen. Der epineurale Nervenring liegt auf dem Boden und am Rande des Mundfeldes, er enthält Nervenfasern und verschiedengestaltete Ganglienzellen sowie an seiner Vorderseite einen Ueberzug von Kernen, von denen aus starke Stützfasern senkrecht durch den Nerven ziehen. Von dem Innenrand der Ringnervenbasis geht eine kontinuierliche Nervenlage aus, die der Ringmuskulatur des Mundfeldes fast unmittelbar anliegt und am Mundrand in den Darm umbiegt, um in demselben erst eine kontinuierliche Schicht unter der Muskulatur zu bilden und sich erst weiter nach hinten in parallele Stränge aufzulösen (Becher). Bei manchen Formen ist nur ein ventraler, zum Darm führender Nervenstrang oder mehrere Einzelstränge vorhanden. Ferner gehen direkt vom Ringnerven die Nervenstränge für die Tentakel ab. Sie entspringen am basalen Außenrande und legen sich hier unmittelbar an die orale Innenseite der Tentakel und zwar an die Muskelschicht ihres Wassergefäßkanales an, den sie vielfach als geschlossenes, innen dickeres Rohr umhüllen (Becher). Die Struktur entspricht im wesentlichen der des Ringnerven, auch kann ein schwacher epineuraler Raum vorhanden sein. Die Radiärnerven, die durch die Grube der Radialstücke des Kalkringes nach hinten laufen (bei Kolostoneura aber gleich dahinter aufhören), weisen gleichfalls wesentlich den Bau des Ringnerven auf, mit der Besonderheit aber, daß die Kernlage der der Haut zugewendeten Oberfläche hier in zwei lateralen „Zellsäulen" etwas konzentriert erscheint. Der Radiärnerv endigt ganz am hinteren Körperende, wo er zum Epidermisepithel hinauflaufen kann, ein Verhalten, das an einen Endtentakel erinnert (Caudina arenata, nach Gerould). Das hyponeurale Radialband ist bedeutend dünner als das epineurale und mit weniger auffallenden Stützfasern versehen, zeigt an der der Leibeshöhle zugewendeten Seite eine feine Längsfurche, kann sich vor dem Kalkring bei den Formen mit Rückziehmuskeln überhaupt in zwei in deren paarige Enden eintretende Aeste spalten. Das Hyponeuralband ist überhaupt wesentlich motorisch, es entsendet Aeste zur Körperwand, die erst ein Stück mit dem vom äußeren Nervenband in die Haut abgehenden Aesten zusammenlaufen, um sich dann aber der Muskulatur eng anzulegen. Zwischen diesen zur Muskulatur bezw. zur Haut in den Interradien führenden und sich in die dortigen Plexus auflösenden Aesten entsendet der radiale Gesamtnerv noch besondere Füßchennerven, die ebenfalls eine epi- und hyponeurale Komponente haben und an der Radialseite der Füßchen aufsteigen können, wobei sie gelegentlich noch von Neuralkanalästchen begleitet werden.

Die Fasern der Füßchennerven gehen zu einem großen Teil zu der sinneszellenreichen Epithelplatte in ihrer Saugscheibe (oder ihrem runden Ende). Unter dieser Epithelplatte ist hier eine reiche Ansammlung von Nerven vorhanden, die Nervenplatte. Auch die Fühler haben zumal an ihrem Ende oder den Enden ihrer Verzweigungen ein hohes sinneszellenreiches Epithel. Sonst sind eigentliche Sinnesorgane selten. Bei Paractinopoden finden sich über den Körper und die Fühler zerstreut die sogenannten „Tastpapillen". Sie stellen erhöhte Stellen der Epidermis dar, die eine äußere Zone von Schlauch-(Gift-?) Drüsen und in der Mitte eine Gruppe von Sinneszellen besitzen. Beide Zellsorten haben Nervenfortsätze, die zu einem kleinen Ganglion an der Basis anschwellen. Die Papillen, die vielleicht der Füßchenendplatte der Actinopoden entsprechen, sind durch Nerven mit den Radiärstämmen und durch direkte Verbindungen untereinander verknüpft. Auf den Tentakeln finden sich bei vielen Paractinopoden die sogenannten Sinnesknospen, die meist mehr oder weniger gestielt sind und eine in ihrem Zentrum mit lebhaft beweglichen Wimpern versehene Einsenkung des Epidermisepithels darstellen, an das von unten ein Nerv herantritt. Bei Leptosynapta minuta und Labidoplax buskii

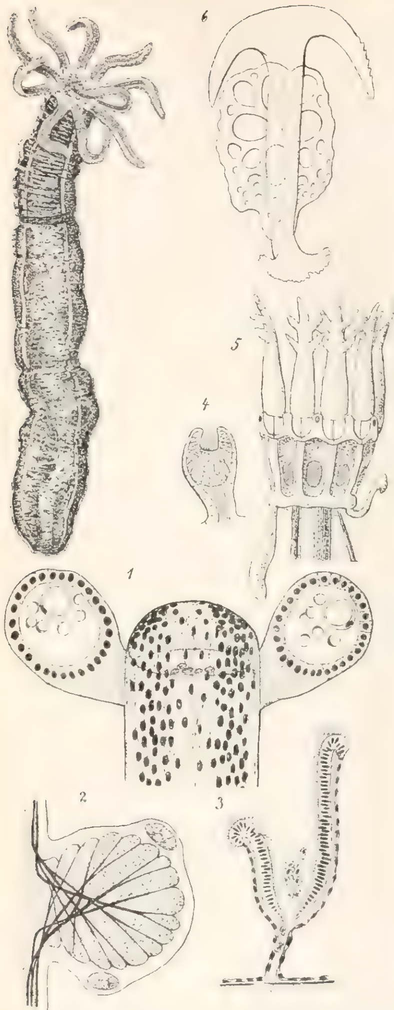


Fig. 26. Organisationsverhältnisse der Paractinopoda. 1 Statocysten an der Umbiegungsstelle des Radiärnerven von Leptosynapta bergensis. 2 Schema eines pulsierenden Peritonealsäckchens. 3 Wimperurne der Leibeshöhle. 4 Sinnesknospe von einem Fühler der Leptosynapta minuta. 5 Ringkanal mit Steinkanal und Polischer Blase, Schlundsinus, Kalkring und Fühler einer Synaptide. 6 Anker und Ankerplatte von Labidoplax thomsonii. 7 Rhabdomolgus ruber. Nach Becher oder neu gezeichnet.

kommen sie auch auf der Körperwand vor, bei Rhabdomolgus ruber nur dort (Becher). Von den bei Holothurien beschriebenen, an Augen erinnernden Pigmentflecken haben sich bisher nur diejenigen der Synaptula hydriformis als einfachste Lichtsinnesorgane erwiesen. Sie liegen in Paaren an der Basis der Tentakel.

Statische Organe treten bei den Paractinopoden und Elpidiiden auf. Sie bestehen aus kleinen, ungefähr runden Bläschen, deren Wand von einem einschichtigen Epithel gebildet und außen von einer dünnen Grenzmembran gegen das Bindegewebe abgeschlossen wird. Im Innern enthalten sie wenige bis zahlreiche, als Statolithen wirkende Inhaltszellen, die von einem runden (Synaptiden) oder länglichen (Elpidiiden) Einschluß unbekannter Natur aufgetrieben sind. Bei Leptosynapta bergensis findet sich ein sehr großer unter den übrigen gleich kleinen Inhaltszellen (Becher). Die früher als „Hörbläschen" gedeuteten Organe sollen durch Einsackung der Epidermis (Semon, Clark, oder des Cölomepithels?, Reimers) entstehen. Bei den Paractinopoden liegen die Hörbläschen zu zweien links und rechts von jedem Radiärnerv direkt hinter dem Kalkring, bei den Elpidiiden treten sie gleichfalls zuweilen am Ursprung der Radiärnerven auf (je ein Paar am l. u. r. p. Radiärnerv bei Kolga hyalina, je ein Paar an dem Ursprung der paarigen Radialnerven bei Elpidia glacialis, am Nervenring bei Parelpidia elongata), besonders aber finden sie sich in mehr oder weniger großer Zahl an den beiden seitlichen antiporalen Radiärnerven entlang in weiter Ausdehnung, wogegen sie dem m. p. Radiärnerv zu fehlen scheinen. Die Bläschen liegen dem Nervenstamm entweder unmittelbar an (Elpidia) oder sie sind durch einen kurzen Nerv damit verbunden.

Wassergefäßsystem. Der Ringkanal ist weit nach hinten verschoben, wo er in der unvollständigen Membran verläuft, die den Peripharyngealraum von der übrigen Leibeshöhle abtrennt. Bei Ilyodaemaon maculatus und anderen Elasipoden ist er mit kleinen Blindsäckchen besetzt. Der Ringkanal trägt immer eine oder mehrere birn- bis keulenförmige Polische Blasen, von denen zuweilen mehrere von einem Stiel entspringen können. In der Jugend haben alle Holothurien nur eine Polische Blase, die an dem Ende des linken kürzeren Schenkels der Hydrocölanlage hängt und daher beim fertigen Tier an der linken Körperseite (im l. a. oder seltener im l. p. I.) angetroffen wird. Bei Molpadiiden, Psychropotiden und Deimatiden bleibt die Einzahl zäh festgehalten, während in den anderen Familien eine Vermehrung nicht selten und bei den Synaptiden sogar häufig ist. Hier können bis zu 50 und mehr Polische Blasen auftreten.

Der Steinkanal, der kein deutliches Axialorgan mit sich führt, mündet fast genau dorsal und meist von hinten in den Ringkanal, zieht dann frei (Mehrzahl der Aspidochiroten) oder an das dorsale (porale), genauer das „Mesenterium des Steinkanals" angelötet nach außen der Körperwand zu, die er aber nur bei Elasipoden, Trochostoma, Ankyroderma, Holothuria lactea erreicht, wogegen er gewöhnlich schon vorher mit einem Madreporenköpfchen endet. Oft, zumal bei Aspidochiroten, trifft man den Steinkanal an

der rechten Seite des Mesenteriums, die in dieser Gruppe auch bei Vermehrung der Steinkanäle bevorzugt ist. Die Vermehrung der Steinkanäle findet sich gewöhnlich nur bei den Arten, die auch vermehrte Polische Blasen aufweisen. Vermehrung des Steinkanals ist bei Aspidochiroten (besonders Holothuria) am häufigsten (dorsale Büschel besonders links), dann folgen Dendrochiroten und Synaptinen, die Zahl der Kanäle ist allerdings bei den Arten der letzteren Gruppen größer, erreicht aber auch bei Holothuria chilensis die ungefähr maximale Zahl von 60 bis 80. Die Mehrzahl pflegt an der dorsalen Seite anzusitzen. Selten kann ein Steinkanal mehrere Madreporenköpfchen aufweisen (2 bei Thyone buccalis, zahlreiche bei Thyone chilensis und Synapta beselii).

Bei vielen Tiefseeholothuren und bei Pelagothuria mündet der Porenteil des Steinkanals mit einfacher Oeffnung (manchmal von Kalkstäbchen umlagert: Kolga hyalina) oder durch vermehrte (Psychropotes und Laetmogonearten) oder zahlreiche (Ilyodaemon maculatus) Poren nach außen, die sich noch auf besondere Hautpapillen erheben können. Auch bei einigen Synaptiden (Anapta ludwigi und amurensis) bleibt die äußere Mündung des Steinkanals erhalten, zuweilen neben inneren Oeffnungen (Synaptula hydriformis). Auch bei zahlreichen Elasipoden, die keine äußere Steinkanalmündung mehr aufweisen, sowie bei Molpadia bleibt das Madreporenköpfchen oder ein äußerer Teil des Kanals in Kontakt mit der Körperwand, obwohl alle Oeffnungen nach innen führen. Bei innerer Oeffnung des Steinkanals kann zuweilen nur eine einzige große Oeffnung vorhanden sein (Rhabdomolgus ruber, Leptosynapta minuta), meist aber ist ein Madreporenköpfchen ausgebildet, das sich durch zahlreiche, manchmal noch verzweigte Poren in die Leibeshöhle öffnet. Das Epithel der Poren ist in der Wand niedriger als am Anfang und Ende (vgl. Asteriden). Zuweilen hat das gewöhnlich rundliche Madreporit die Gestalt einer Lanzette oder einer gefalteten Platte (Holothuria mexicana, marenzelleri, lubrica). Bei Colochirus quadrangularis erweitert sich der Steinkanal vor dem Madreporenköpfchen zu einem blasenförmigen Raum; bei Aspidochiroten münden die Porenkanälchen nicht direkt in den Steinkanal, sondern in einen großen, mit niedrigem Epithel versehenen, von Balken durchsetzten Sammelraum, in den der Steinkanal mit meist unpaarer Mündung eintritt.

Nach ihrer Lage zwischen Porenkanal oder Kanälchen und Steinkanal könnte die Madreporenblase oder der Sammelraum mit dem Axialsinus verglichen werden. In der Tat finden wir auch bei der Larve eine kleine dünnhäutige Ausbuchtung am Steinkanal, die früher (Synaptiden) oder später entsteht, mit dem vorderen linken Enterocöl homologisiert worden ist und wahrscheinlich in die Madreporenblase übergeht. Doch ist diese Deutung nicht ohne Widerspruch (Ludwig, Reimers) geblieben.

Der Steinkanal hat seinen Namen von den vielen meist und besonders am Köpfchen zu einem Netzwerk verbundenen Spicula seiner Bindegewebsschicht. Doch kann die Verkalkung auch unterbleiben (Elpidia glacialis, Pelagothuria, Rhabdomolgus, Cucumaria tenuis und andere). Muskeln fehlen. Das Bindegewebe ist nur wenig lakunär, d. h. ein Axialorgan ist nicht ausgebildet. Das Innenepithel ist hoch und bewimpert, an der vom Mesenterium abgewendeten (oder konvexen) Seite höher als an der anderen. Die Wimpern sind nach dem Ringkanal zu gerichtet.

Die Radiärkanäle gehen vom Ringkanal erst als starke Stämme bis zum vorderen Körperende, wo die Fühlergefäße abgehen, verengen sich ungefähr dort und laufen bis zum hinteren Körperende, wo sie zuweilen (Molpadiiden) einen etwas vorragenden (etwas apikal von der Stelle, wo der Nerv zur Haut tritt) Endtentakel („Analpapille") bilden können.

Bei den Paractinopoden sind die Radiärkanäle zu kurzen Stummeln rückgebildet, die nachher in die Tentakelkanäle aufgehen, jedoch wenigstens in der Jugend erkennbar bleiben. Die Füßchen gehen meist abwechselnd links und rechts von den Radiärgefäßen ab und öffnen sich mit einer Klappe in einen kurzen Auswuchs des Raumes, der die Füßchen mit ihrer Ampulle verbindet. Bei Psychropotiden scheinen die Ampullen zu fehlen, bei vielen anderen Elasipoden sind sie „innere Ampullen", d. h. sie ragen nicht blindsackartig in die Leibeshöhle hinein; sie sind hier oft (besonders bei Deimatiden) verästelt. Sonst pflegen die Ampullen rundliche Form zu haben und mit Cölomepithel überzogen in die Leibeshöhle vorzuragen. Sie drängen dabei die Quermuskulatur etwas zur Seite und erhalten vielleicht dabei einen Sphincter. Bei Ausbreitung der Füßchen über die Radien können die Füßchenkanäle sich verzweigen und jeder Stamm mehrere versorgen.

Bei den Füßchen unterscheidet man lokomotorische, die meist eine Saugscheibe und ein Kalkendscheibchen (bei Elasipoden fast immer fehlend) haben, und die nicht lokomotorischen, meist dorsalen, warzen- bis fühlerförmigen „Ambulakralpapillen" ohne Saug-und Endscheibe. Viele Dendrochiroten (auch die aspidochirote Labidodemas) besitzen nur Füßchen, einige Holothuriiden nur Ambulakralpapillen, sehr oft kommen sie zusammen vor. Vielfach trifft man bei kleinen Arten die Füßchen auf die Radien beschränkt (fast immer bei Elasipoden), oft findet aber auch, zumal bei den Papillen, Ausbreitung über die Interradien statt. Besondere Verhältnisse bringt die starke Markierung von Bauch und Rückenseite und die Differenzierung einer besonderen Kriechsohle mit sich. Es kann dabei einerseits zunächst zur Verstärkung der Füßchenreihen des mittleren ventralen Radius gegenüber den seitlichen ventralen kommen (einige Holothuria- und Stichopusarten, ferner Colochirus), später aber umgekehrt der mittlere ventrale Radius seine Füßchen mehr und mehr verlieren (viele Elasipoden), während die seitlichen ventralen Radien vorn und hinten in Zusammenhang zu treten beginnen (Psolus, Theelia, Psolidium). Bei Psolus hat das Bivium sowie das bei jener Vereinigung nicht eingeschlossene vordere und hintere ventrale Stück alle Füßchen verloren. Bei Elpidiiden stehen die Ambulakralpapillen in größerer oder geringerer Zahl in den dorsalen Radien, die lokomotorischen Papillen oft in einer Reihe in den seitlichen ventralen Radien, wo sie zu einem Hautsaum

verbunden sein können, der sicher bei einer, und offenbar bei zahlreichen Arten zum Schwimmen benutzt wird (Psychropotiden). Bei Elpidiiden können manchmal nur äußerst wenig Ambulakralfüßchen vorhanden sein, sie sind dann gewöhnlich sehr groß und entsprechen sich an der einen und anderen Körperhälfte (Scotoplanes, Elpidia usw.). Ein Füßchenkranz um das vordere Körperende kann durch einen Hautsaum zu einer Schwimmscheibe ausgestaltet werden, ähnlich kommt das „Nackensegel" einiger Elpidiiden zustande. Der erwähnte Bauchsaum der Psychropotiden, einiger Aspidochiroten und Synallactiden hat ähnlichen Ursprung. Am Hinterende können sich zwei von derselben Haut umschlossene Papillen zu einem zapfenförmigen Gebilde (Euphronides) oder zu einem riesigen Schwanzanhang (Psychropotes) entwickeln.

Bei den Synaptiden fehlen die Füßchen und Papillen (von den Fühlern abgesehen) ganz, bei den Molpadiiden, bei denen die Radiärkanäle noch erhalten sind, finden sich bei primitivsten Arten (Gephyrothuria und Himasthlephora) noch zahlreiche gut ausgebildete Ambulakralanhänge (zumal auf dem Rücken), bei den meisten anderen aber sind auch diese geschwunden, doch nicht ohne in den manchmal neben dem Endtentakel vorhandenen seitlichen, zuweilen in der Haut verborgenen, Ausstülpungen (Analpapillen) der Radiärkanäle einen Hinweis auf früheren Besitz zu hinterlassen.

Fühler. Die Fühler stellen wahrscheinlich vorderste Füßchen dar. Sie entspringen dementsprechend im allgemeinen auch (meist jedes für sich) von dem Anfang der Radiärkanäle, die vor dem Kalkring zwei Seitenäste abgeben, welche sich durch ein „Fühlerventil" mit der Basis des Fühlerhohlraums in Verbindung setzen. Bei der Larve treten vielfach zuerst 5 Fühler auf, die in asymmetrischer Weise von den Radiärkanälen entspringen: je einer links und rechts vom l.p.R. und vom m.a.R und ein unpaarer rechts vom r.p.R. Zwischen diese schieben sich dann später 5 andere so ein, daß von jedem Radiärkanal nach jeder Seite ein Fühler abgegeben wird. Bei Synaptiden entspringen die Fühler entweder von kurzen Stummeln der Radiärkanäle (Clark) wie bei den Dendrochiroten oder aber (bei völliger Rückbildung der Radiärkanäle) alle (bei Verzweigung zum Teil) direkt vom Ringkanal aus, dann schieben sich aber die 5 späteren „Sekundärfühler" in derselben Weise zwischen die primären ein wie bei Dendrochiroten, woraus hervorgeht, daß früher bei Synaptiden ein ganz ähnlicher Ursprung der Fühler von den Radiärkanälen vorliegen mußte wie bei Cucumariiden. Bei Holothuriiden verläuft die Fühlervermehrung etwas anders. Die Zahl der Fühler schwankt zwischen 10 und 30. 10 Fühler finden sich fast ausschließlich bei Elpidiiden, häufig bei Dendrochiroten sowie bei kleinen Synaptiden (Rhabdomolgus, Trochoderma, Trochodota und kleinen Arten anderer Gattungen). Die Zahl 11 tritt merkwürdigerweise konstant bei Labidoplax buskii auf. Viele Synaptiden haben 12 (bis 27), die Molpadiiden außer der zehnfühlerigen Caraplectana immer 15 (wovon 4 im m. p. I., je 3 im l. u. r. a. I. stehen). Die Deimatiden und Aspidochiroten bevorzugen die Zahl 20. Außer bei den Synaptiden (10 bis 27) schwankt die Zahl bei den Dendrochiroten (10 bis 30) und den Aspidochiroten (18 bis 30) am erheblichsten.

Bei 10 kommen auf jeden I 2, bei 11 hat der m. d. I den überzähligen, bei 12 stehen in den seitlichen dorsalen I je 2 (bilateralsymmetrisch), bei 15 Tentakeln kann wieder Radialsymmetrie herrschen oder aber die komplizierte Molpadiidenanordnung. Sonst scheint bei höheren Vielfachen von 5 radiäre Anordnung angenommen zu werden. Bei Dendrochiroten sind oft die beiden dem m. a. Radius benachbarten Fühler kleiner als die übrigen. Von 20 oder 30 Fühlern bei Dendrochiroten pflegen alle adradialen Paare kleiner zu sein als die übrigen und können dann durch mehr zentrale oder distale Stellung einen zweiten inneren oder äußeren Fühlerkreis bilden.

Die Fühler können einfach fingerförmig (Rhabdomolgus, Leptosynapta minuta, Haplodactyla molpadioides u. a.) sein oder fiederförmig mit oder ohne Terminalast und mit mehr oder weniger (bis zu einem) Seitenästchen (Paractinopoden und Molpadiiden) oder schildförmig mit Stiel und Endscheibe, der noch wieder einfache oder gelappte Zipfel ansitzen können (Aspidochiroten, meiste Synallactiden, Elasipoden) oder schließlich baumförmig verzweigt bei Dendrothuria und den „Dendrochiroten", die sie zum Planktonfang benutzen. Die einzelnen Aeste können hier wie ein Füßchen abgestutzt endigen (Ocnus pygmaeus). Bei Chiridotinen können die etwa händchenförmig endigenden Fühler zuweilen in ihren breiteren Basalteil zurückgezogen werden. Wie die Füßchen, so besitzen auch die Tentakel ihre Füßchenampullen. Sie stellen den Teil des basalen Fühlers dar, der sich auch außen vom Kalkring mehr oder weniger weit nach hinten erstreckt. Eine kurze Aussackung besitzen die Fühler hier fast immer, der Kalkring zeigt an seinen Gelenkstellen bei den Synaptiden deutlich eine Grube für dieselben. Bei den typischen Aspidochiroten (nicht den Synallactiden) und Molpadiiden (nicht Eupyrgus, Himasthlephora und Gephyrothuria) sind die Fühlerampullen lang und hängen frei in die Leibeshöhle hinein.

Histologisch finden wir in den Teilen des Wassergefäßsystems innen das meist (im allgemeinen freilich nicht so stark wie im Steinkanal) bewimperte Epithel, dann eine Grenzmembran, außen davon eine Muskelschicht, die in den Füßchen, Füßchenampullen, den Fühlern und Fühlerampullen im wesentlichen als Längsmuscularis, in der Polischen Blase dagegen als Ringmuskelschicht entwickelt ist. Dann folgt eine Bindegewebslage, die in Füßchen und Fühlern, zuweilen auch im Kalkring, ganz besonders aber im Steinkanal Spicula zu enthalten pflegt, und schließlich bei frei in die Leibeshöhle vorspringenden Teilen das Cölom-, bei äußeren Anhängen das Epidermisepithel. Von den Nerven der Füßchen und Fühler wurde bereits berichtet, auch die besondere Umgebung der Radiärkanäle schon geschildert. Der Ringkanal scheint zuweilen Ring- und Längsmuskulatur aufweisen zu können, auch im ersten Teile der Radiärkanäle kann zu den Längsmuskelfasern hydrocölischen Ursprungs eine vom Cölomepithel stammende Ringmuskelfaserschicht hinzutreten. Während ihres Laufes in den Radien der Körperwand zeigen die Radiärkanäle nur an ihrer dem

Nerven zugekehrten Seite eine Lage von Längsfasern, die sich auch nach Rückbildung des Radiärkanals (bei Paractinopoden) als Rudiment erhalten kann (Becher).

Leibeshöhle. Die Leibeshöhle zerfällt in das große Cölom und in den Schlundsinus oder Peripharyngealraum, der wahrscheinlich dem Oralsinus entspricht und bei der Larve als ein fingerförmiger Fortsatz des linken Cöloms entsteht, der sich dem Hydrocöl anlegt und mit diesem zum Kreis geschlossen wird. Später tritt weite Kommunikation mit dem Cölom zwischen den Radiärkanälen sowie zwischen Darm- und Wassergefäßring ein. Doch bleiben einige Stränge erhalten in den epithelbekleideten muskelführenden Bindegewebszügen, die sich zwischen Ringkanal und Oesophagus befinden. Der Ringkanal liegt in der Trennungsschicht von Schlundsinus und Leibeshöhle, der Kalkring außen an seinem Vorderende. Von den Kalkringstücken ziehen nach dem Oesophagus zuweilen in regelmäßiger Anordnung die bindegewebigen, mit Cölomepithel und darunter liegender Muskulatur ausgestatteten Schlunddilatatoren, am hinteren Körperende laufen ähnliche „Kloakendilatatoren" von der Körperwand zum Enddarm. Das Cölomepithel hat den typischen Charakter, bei zahlreichen Paractinopoden (nicht bei Rhabdomolgus, Labidoplax buskii usw.) bildet es oft in Streifen angeordnete oder zu Bäumchen vereinigte „Wimperurnen". Sie stellen Ausstülpungen des Cölomepithels mit Bindegewebsfüllung dar, die an ihrem freien Ende das dort stark erhöhte und wimpernde Cölomepithel wieder pantoffel- bis urnenförmig eingeschlagen haben. Sie scheinen durch Bewegung der Körperflüssigkeit der Atmung und durch Agglutinierung von beladenen Wanderzellen (die durch ihre Basis in die Cutis eindringen?) der Exkretion zu dienen. Bei Labidoplax buskii und wahrscheinlich auch anderen Formen besitzt die Leibeshöhle hinten ein paar große verschließbare Abdominalporen, die dem Austritt von Exkretionswanderzellen und neben der Exkretion auch vielleicht noch der Atmung dienen. Die Flüssigkeit der Leibeshöhle stimmt mit der des Wassergefäßsystems überein, sie ist etwas eiweißhaltig und führt verschiedene Formen beladener und unbeladener Wanderzellen.

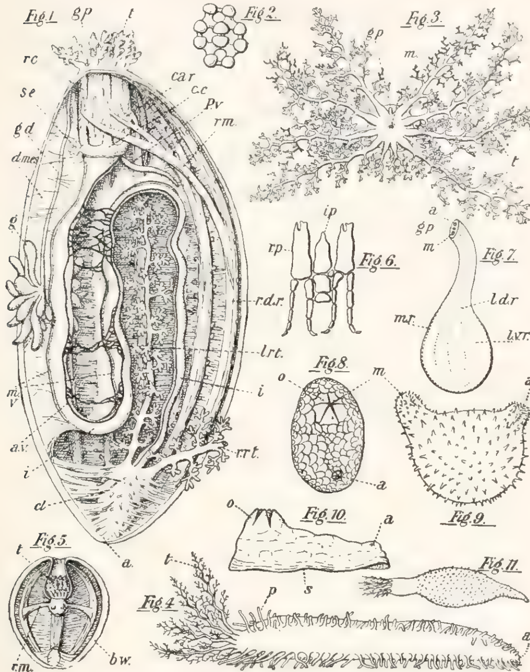


Fig. 27. Organisation der Dendrochiroten (Cucumariiden). 1 A Cucumaria pentactes (Linn.) im r p J geöffnet, rechter Kiemenbaum gekürzt. 2 Schnallenförmiges Kalkkörperchen. 3 Oralansicht. 4 Seitenansicht. 5 Innenansicht derselben Art (ohne Eingeweide) mit zurückgezogenen Fühlern. 6 Kalkringausschnitt von Orcula tenera Ludw. 7 Rhopalodina lageniformis Gray. Schematisiert. 8 Rückenansicht von Psolus antarcticus (Philippi). 9 Sphaerothuria bitentaculata Ludw. 10 Theelia ambulatrix Bell. 11 Thyone fusus (O. F. Müller). a After; a.v. Antimesenteriallakune; b.w. Körperwand; c.a.r. Kalkring; c.c. Ringkanal; cl Cloake; g Gonade; g.d. Genitalgang; g.p. Geschlechtsöffnung; i Dünndarm; i.p. Interradialglied; l.d.r. linker dorsaler (poraler) Radius; l.r.t. linker Kiemenbaum; l.v.r. linker ventraler (antiporaler) Radius; m Mund; m.r. mittlerer antiporaler Radius; m.v. mesenteriale Blutlakune; p Füßchen; p.v. Polische Blase; r.c. Radialkanal; r.d.r. rechter dorsaler (poraler) Radius; r.m. Retraktormuskel; r.p. Radialglied; r.r.t. rechter Kiemenbaum; s Kriechsole; s.c. Steinkanal; t Tentakel. Aus Goodrich.

Darm. Die drei Darmschenkel können bei den sehr langen Synaptiden gelegentlich verstreichen, die eigentliche Darmwindung, d. h. der Uebertritt des Mesenteriums aus dem m. p. I. in den r. a. bleibt aber fast immer erhalten. Der Darm beginnt mit einem unbewaffneten Mund, der durch sphincterartige Wirkung der dortigen Ringmuscularis geschlossen werden kann. Mund und Mundscheibe sind oft ganz terminal gelegen, in der Gruppe der Elasipoden, Synallactiden und Aspidochiroten aber meist mehr oder weniger ventral, bei einigen Dendrochiroten (Psolus, Theelia, Colochirus: Planktonfänger!) dorsal. Aehnliches gilt vom After, der bei Psychropotiden oft ventral, bei Elpidiiden und Dendrochiroten (Psolus, Colochirus) nicht selten dorsalwärts verschoben ist. Bei vielen Molpadiiden und Dendrochiroten finden sich 5 radiäre oder interradiale Kalkzähne in der Nähe des Afters, sie können bei Psolus und Theelia zu großen dreieckigen Analklappen werden, die ähnlichen oralen Platten der Stelle entsprechen, die den Verschluß über dem eingestülpten Tentakelkranz und Rüssel bilden. Bei jenen Dendrochiroten mit dorsalem Mund und After sind diese beiden Oeffnungen genähert, das geht weiter bei Sphaerothuria und Ypsilothuria und findet seine extreme Ausbildung bei Rhopalodina, bei der Mund und After auf einem gemeinsamen Fortsatz des flaschenförmigen Körpers liegen, während diese extreme Verkürzung des m. d. I. eine Knickung der Radien herbeiführt, die 10 Ambulakren statt 5 vortäuscht.

Am Darm lassen sich immer ein meist längsfaltiger Oesophagus oder Vorderdarm, ein Mittel- und ein Enddarm unterscheiden, zuweilen ist auch ein gewöhnlich drüsen- und muskelreicher Magen hinter dem Oesophagus ausgebildet. Histologisch besteht das Darmrohr von außen nach innen aus Cölomepithel, aus Längs- und Ringmuskelfasern, die ziemlich dicht unter dem äußeren Epithel verlaufen, aber noch eine feine „äußere Bindegewebslage" dazwischen lassen können, dann aus der inneren Bindegewebsschicht, in der außen wieder die Nerven oder die Nervenschicht, innen aber ein Lakunennetz angetroffen wird, und schließlich das Innenepithel, das wieder in den verschiedenen Darmabschnitten einen verschiedenen Charakter aufweisen kann. Im Dünndarm pflegt es viele Drüsenzellen und manchmal auch Wimperung aufzuweisen. Bei Stichopus- und Holothuriaarten kommen 2 bezw. 4 Reihen von Querfalten im Dünndarmepithel vor: Sie werden von Blutlakunen umgeben und als Darmkiemen bezeichnet.

Kiemenbäume. Die Kiemenbäume oder Wasserlungen fehlen den Synaptiden und Pelagothuria völlig, bei Deimatiden zeigt nur Laetmogone wyville-thomsoni, und diese Art nur individuell, einen Darmblindsack. Von den Psychropotiden besitzen Benthodytes sanguinolenta und sibogae einen dorsalen Darmblindsack, bei Elpidiiden tritt derselbe häufiger auf. Die Synallactiden (auch die Benthodytes nahestehenden Gattungen Benthothuria und Paelopatides) zeigen schon wie die Dendrochiroten und Molpadiiden eine typische Wasserlunge, doch tritt erst bei den Aspidochiroten regelmäßig eine Verbindung des linken Kiemenbaumes mit dem Wundernetz des Darmblutgefäßsystems auf. Wahrscheinlich beruht der Mangel der Kiemenbäume auf Rückbildung bei langgestreckten (Paractinopoden) oder mit reichlicher Füßchenatmung (Deimatiden) oder schwimmenden (Pelagothuria und manche Psychropotiden) Formen, bei denen immer in anderer Weise für hinreichenden Gaswechsel gesorgt ist. Es gibt eine große Auricularialarve (Auricularia nudibranchiata), die schon einen dicken Darmblindsack besitzt, und vielleicht kommt ein kleiner Rest auch der Larve von Synapta digitata zu (Reimers). Meist entsteht die Darmkieme bei den jungen Tieren etwas später.

Die Wasserlunge besteht gewöhnlich aus zwei Aesten, die manchmal auch getrennt vom Darmende, der „Kloake", entspringen können. Sie legen sich in den rechten poralen und in den linken antiporalen J., d. h. in die beiden von Darmschlingen freien Interradien, wo sie an Körperwand oder Darm durch feine mesenteriale Bändchen aufgehängt sind. Jeder Ast ist meist reich verzweigt und endet oft überall mit kleinen Bläschen (denen vielleicht kleine Poren zukommen). Neben der Atmung sollen die Kiemenbäume der Exkretion dienen, man hat Guanin und Harnsäure in ihnen gefunden und beobachtet, daß mit Tusche beladene Wanderzellen sich an ihren Enden ansammeln, durchwandern und durch die Kloake entfernt werden. — Histologisch bestehen die Kiemenbäume außen aus Cölomepithel, einer dünnen äußeren Bindegewebslage, Ring- und Längsmuskellage, einer inneren Bindegewebsschicht mit gelben Körnern (Haufen beladener Wanderzellen) und dem wimpernden Innenepithel, das zahlreiche, durch dicke gelbkörnige Massen bedingte Vorsprünge aufweist.

Cuviersche Organe. Von der Basis der Kiemenbäume (selten höher), von ihrem Hauptstamm oder der Kloake gehen bei Holothuria- und Mülleriaarten, Molpadia chilensis und Cucumaria nigricans Blindschläuche ab, die gewöhnlich einfach sind, seltener (besonders bei Mülleria) verzweigte oder traubige (Molpadia chilensis) Gestalt haben. Sie sind mit den Interradialcöca der Asteriden homologisiert worden, stellen aber wahrscheinlich modifizierte Kiemenästchen dar. Ihr inneres Lumen ist sehr eng und von einem schleimzellenführenden Epithel umgeben, das an die innere Bindegewebsschicht stößt. Auf diese folgt ein muskulöser Spiralfaden, weiter nach außen Längsmuskelfasern, eine äußere Bindegewebsschicht und das stark modifizierte Cölomepithel, das jedenfalls in seinen Zellen dicht mit Körnern erfüllt ist und beim Kontakt mit dem Seewasser die Klebrigkeit der Organe bedingt, welche die Tiere benutzen. Die Cuvierschen Organe können nämlich durch Risse oder Oeffnungen in der Kloake ausgestoßen werden und einen Angreifer in ein klebriges Netz von sich jetzt stark ausdehnenden Fäden verspinnen (die abreißen oder jedenfalls nicht mehr aufgenommen werden). Andere Forscher sehen hierin nur eine leicht pathologische Erscheinung und suchen die Normalfunktion in einer vermuteten Exkretion. (Bei Mülleria fehlen die Drüsen und die Klebrigkeit.)

Blutlakunensystem. Eine Ringlakune findet sich mehr oder weniger deutlich an der Innenseite des Ringkanales. Von ihr steigen mit den Aesten des Wassergefäßsystems die 5 Radiärlakunen (und bei Synaptiden die Fühlerlakunen) auf, die also zunächst auf der Innenseite, jenseits

vom Kalkring aber nach außen vom Radiärkanal liegen. In den Fühlern steigen die bei den Actinopoden von den Radiärlakunen abgehenden Tentakellakunen direkt nach außen von dem Wassergefäßkanal bezw. seiner Muskelschicht auf, und zwar unter dem Nerven bezw. dessen dickster Stelle (d. h. an der Oralseite). Ganz Entsprechendes gilt von den kleinen Füßchenlakunen. Die Tentakellakunen machen natürlich eventuelle Verzweigungen ihres Trägers mit. — Die große Wanderzellenstraße in der Basis der Cutis, dicht über der Muskulatur, wurde schon erwähnt. Sie steht durch die Kloakendilatatoren, sowie am vorderen Körperende mit dem Lakunensystem des Darmes in Verbindung.

Die Darmlakunen sind nur in dem mittleren Darmteile recht deutlich, am Enddarm verlieren sie sich, und auch vorn ist ihr Zusammenhang mit dem Blutgefäßring manchmal nicht deutlich. Die Lakunen stellen wulstförmige Vorbuchtungen des Darm- oder Mesenterialcölomepithels dar, die von Bindegewebe tapeziert sind und einen zuweilen zerteilten Hohlraum aufweisen. Das Cölomepithel bildet zumal in vorderen Teilen der Ventrallakune kräftige Ringmuskelfasern, auch Ring- bezw. Querfasern scheinen auftreten zu können. Die Ventrallakune, die sich vorn an den Stiel der Polischen Blase ansetzen kann, entfernt sich zuweilen etwas vom Darm selbst, der dann unmittelbar von einem „anliegenden“ Gefäß begleitet wird, welches seinerseits mit dem freien Gefäß reichlich kommuniziert. Fast immer geht von dem antimesenterialen Gefäß des ersten Darmschenkels ein zuweilen in ein Netzwerk aufgelöstes Quergefäß zu derselben Lakune des zweiten Darmschenkels (oder des Anfangs des dritten) hinüber. Die Aeste des linken Kiemenbaumes können zuweilen ein wenig in die Maschen dieser Querlakune hineinragen. Das dorsale Gefäß läuft merkwürdigerweise immer auf derselben Seite des zusammenhängenden einheitlichen Mesenteriums, nämlich derjenigen, die im ersten Darmschenkel die linke ist. Das mesenteriale Gefäß ist sehr häufig etwas vom Darme entfernt, was dann auch hier bei größeren Arten den Anlaß zu einer Trennung einer freien marginalen von einer dem Darm unmittelbar „anliegenden“ Lakune gibt. Die beiden können hier bei Molpadiiden, Dendrochiroten, besonders aber bei Aspidochiroten recht weit getrennt und durch ein breites, zuweilen noch in kleinere Einzelnetze zerfallendes „dorsales Wundernetz“ verbunden sein. Dieses dorsale Wundernetz (in dem sich zahlreiche Lücken zwischen den einzelnen Kanälchen ausbilden) umspinnt die Aestchen des linken Kiemenbaumes, wobei allerdings kaum eine eigentliche Kommunikation mit den Lakunen des Kiemenbindegewebes einzutreten scheint, sondern nur eine äußerliche Umspinnung oder Anheftung zustande kommt. Ob den Wundernetzen neben derjenigen einer Aeration des Blutes auch noch eine exkretorische Funktion zukommt (worauf leicht ablösbare pigmentführende Schleimzellen des äußeren Epithels hinweisen) steht dahin. Zuweilen, bei Mangel eines Wundernetzes, scheint dasselbe durch eine kleine Querlakune vertreten zu sein, die sich hier ähnlich wie beim antimesenterialen Quergefäß vom ersten Darmschenkel zum zweiten oder dritten hinüberziehen kann (Labidoplax digitata, Kolga hyalina, Deima validum).

Die Darmwand selbst, insbesondere die des Dünndarmes, enthält dicht unter dem inneren Epithel ein reich entwickeltes Lakunensystem, das an den oben erwähnten Darmkiemen besonders dicht ist.

Zu den Geschlechtsorganen zieht vom Ringkanal eine Genitallakune schräg nach hinten, (Fig. 26, 5), um sich bei der Genitalbasis auf die einzelnen Schläuche auszudehnen, die außerordentlich weite, manchmal den Eindruck eines großen Spaltes der Wand machende Lakunen aufweisen. Bei Paractinopoden stellt sich dieses Gefäß einfach als Verlängerung des mesenterialen Gefäßes dar, das sich in Höhe der Geschlechtsbasis zu dieser hin und vom Darm abwendet, um dann von der Genitalbasis aus nach vorn zur Innenseite des Ringkanales zu steuern. Dieser letzte Teil ist wie auch bei den Actinopoden von einem Sinus begleitet (dem „problematischen Kanal“), der wohl den aboralen oder genitalen Sinus bei den Holothurien repräsentiert (Fig. 25, Sg).

Geschlechtsorgane. Die Geschlechtsorgane gehen in ihrer Entwickelung von einigen Zellen aus, die sich an der Wand des dorsalen Mesenteriums von dessen Cölomepithel aus bilden; diese senken sich ins Bindegewebe, wuchern zu einem Haufen mit Hohlraum, der die spätere Geschlechtsbasis (Fig. 25, G) repräsentiert und nun einerseits die Geschlechtsschläuche als schlauchförmige Auswüchse treibt, die die Mesenterialwand vor sich her schieben, und andererseits den Ausführungsgang bildet, der sich durch das Mesenterium zur Körperwand hinbegibt, um dorsal zu münden. Bei Mesothuria intestinalis bleibt ein von der Geschlechtsbasis in der linken Wand des Ausführungsganges ziehender Stolo mit undifferenzierten Geschlechtszellen erhalten. Die Geschlechtsöffnung liegt bei Psychropotes longicauda nahe am Hinterende, sonst immer in der vorderen Körperhälfte; ziemlich weit hinten bei Psychropotiden und Deimatiden, mehr nach vorn bei Elpidiiden und Aspidochiroten, ziemlich nahe hinter dem Fühlerkranz bei Molpadiiden und vielen Synaptiden, zwischen oder sogar innerhalb des Fühlerkranzes bei den meisten Dendrochiroten. Das Extrem der Vorwärtswanderung wird bei unseren Nordseearten Leptosynapta inhaerens und bergensis erreicht, wo die Oeffnung nahe an der Spitze des rechten Fühlers des m. p. I. (Becher) liegt. Bei nach außen mündendem Steinkanal (Elasipoden) liegt der Genitalporus hinter dessen Oeffnung. Oft (besonders bei Dendrochiroten und Elasipoden ist die Oeffnung auf die Spitze einer Genitalpapille gerückt, bei Laetmogone wyville-thomsoni mit Muskeln und Hohlräumen versehen; bei der letztgenannten Gruppe kann sich der Endteil des Kanales auch teilen, so daß wir mehrere Geschlechtsöffnungen erhalten. Der Genitalstrang ist bewimpert und kann Drüsen enthalten (bei Leptosynapta inhaerens, Becher). Im einfachsten Falle ist nur ein von der Genitalbasis nach rechts abgehender Geschlechtsschlauch vorhanden (Rhabdomolgus ruber, Leptosynapta minuta), andere, meist kleine Formen (z. B. Labidoplax buskii, Acanthotrochus mirabilis, ein paar Psychropotiden usw.) haben jederseits nur einen Schlauch, gewöhnlich aber sind auf einer oder auf beiden Seiten des Mesenteriums mehrere bis zahlreiche Schläuche vorhanden (wobei die eine oder die andere Seite überwiegt). Ein Büschel und zwar ein linkes

ist bei vielen Elpidiiden, ferner bei den Gattungen Holothuria, Labidodemas, Mülleria, Gastrothuria und bei den ihnen nahestehenden Synallactidengattungen Mesothuria und Zygothuria vorhanden. Jeder Schlauch kann noch wieder verschiedene Gestalt haben und selbst weiter verzweigt sein, so daß eine große Mannigfaltigkeit von Formen vorliegt. Die Geschlechtsbasis liegt bei Synaptiden und Molpadiiden ziemlich weit vorn, rückt aber bei den anderen Gruppen oft sehr weit nach hinten, viel weiter als die Geschlechtsöffnung.

Histologisch betrachtet zeigen die Geschlechtsschläuche außen das Cölomepithel, darauf folgend und gewöhnlich in direktem Kontakt damit die Muskelschicht mit Längs- oder (bezw. mit) Ringmuskelfasern, weiter das Bindegewebe, mit eingelagerten ausgedehnten Lakunen und das innere Keimepithel, das Follikel um die Eier bildet.

Die Geschlechter sind im allgemeinen getrennt, an den weißen Hoden und den mehr farbigen Ovarien zu erkennen, äußerlich aber nur zuweilen an der Genitalpapille oder an Brutpflegeeinrichtungen des Weibchens zu unterscheiden. Viele Paractinopoden sind zwitterig, und zwar so, daß Eier und Samenzellen in demselben Schlauch nebeneinander entstehen, gewöhnlich allerdings wohl zu mehr oder weniger verschiedenen Zeiten. Auch unter den Actinopoden gibt es Zwitter, so z. B. Mesothuria intestinalis, wo die (vorn immer ersetzten und hinten aufgelösten) Schläuche zum Teil männlich, zum Teil weiblich sind, oder Cucumaria laevigata, die in denselben Schläuchen, zu denen sich vorn immer neue bilden, erst Eier und später Samenzellen bildet. Jedes Individuum ist erst männlich, dann abwechselnd weiblich und männlich. Die Eier der Actinopoden zeigen eine Zona radiata, die denen der Paractinopoden zu fehlen scheint. Nach Russo sollen bei Holothuria poli, tubulosa und forskalii die Gonaden zwischen den Geschlechtsperioden durch Hinausbeförderung von gelbkörnigen Sekreten, die durch Wanderzellen dort hingeschafft werden, der Exkretion dienen.

Brutpflege findet sich in den Familien der Dendrochiroten und Synaptiden. Bei Synaptula hydriformis (Lesueur), Leptosynapta minuta (Becher), Chiridota rotifera (Pourt.), Thyone rubra Clark und Phyllophorus urna Grube finden sich die Jungen in der Leibeshöhle (gelangen meist durch abdominale Ruptur nach außen), bei Taeniogyrus contortus (Ludwig) entwickeln sie sich in den Genitalschläuchen. Bei Cucumaria crocea (Lesson) finden sich die Jungen auf den dorsalen Ambulakren, bei Psolidium nutriens (Clark) in der Rückenhaut des alten Tieres, bei Psolus ephippifer Wyv. Thomson unter den Rückenplatten und bei antarcticus (Philippi) auf der Kriechsohle des Muttertieres. Bei Cucumaria laevigata (Verr.) und glacialis (Ljungm.) dienen Hauteinstülpungen der ventralen Interradien als Bruträume. Ueber Cucumaria curata Cowles ist noch nichts Näheres bekannt.

b) Systematik. Zur systematischen Einteilung ist das Fehlen oder Vorhandensein von Füßchen (Apoda-Pedata) oder von Wasserlungen (Apneumona-Pneumona), weiterhin die Gestalt der Fühler (Dendrochirota-Aspidochirota), das Fehlen oder Vorhandensein von Fühlerampullen und einer Umspinnung des linken Kiemenbaumes durch ein Wundernetz, endlich die Zahl und Verbreitung von Fühlern und Füßchen, die doppelte oder einfache Natur der Radiärmuskeln, das Auftreten von Rückziehmuskeln, die Kalkkörper und der Kalkring und manches andere herangezogen worden. Wir haben eine Anzahl scharf umschriebener und auch biologisch gut charakterisierter Gruppen, nämlich die Synaptiden, Molpadiiden und Dendrochiroten, auf der anderen Seite finden wir unter den übrigen Holothurien mit schildförmigen Fühlern trotz weitgehendster Differenzen ziemlich viele Uebergänge und Gruppen, die phylogenetisch vielleicht nicht einheitlich sind. Insbesondere scheinen die Synallactiden eine Gruppe von Formen zu vereinigen, von denen Arten in verschiedenster Entwickelungsrichtung abgegangen sind. Die ältesten, aber nach verschiedenen Richtungen spezialisierten Holothurien scheinen die Synaptiden und die Elpidiiden zu sein. Diese beiden Gruppen könnten auch auf Grund des Vorkommens von Statocysten einander genähert werden. Viele Gattungen sind anatomisch zu wenig bekannt und hindern dadurch eine genaue Charakterisierung der Gruppen.

Klasse: Holothurioidea, Seewalzen.

1. Ordnung. Paractinopoda Ludwig 1891. Keine eigentlichen Füßchen, nur Fühler vorhanden, die vom Ringkanal oder von kurzen Stummeln der fast völlig geschwundenen Radiärkanäle entspringen.

1. Familie. Synaptidae Burmeister 1837. Der zylindrische Körper lang wurmartig ausgezogen mit terminalem Mund und After. Mit 10 bis 27 Tentakeln, oft auch mit vermehrten Interradialgliedern des Kalkringes. Fühler einfach, gefiedert oder gefingert. Nur angedeutete, keine freie Fühlerampullen. Mit 5 Paaren statischer Organe am Ursprung der Radiärnerven. Radialmuskeln nicht mit durchgeführter Teilung, zuweilen mit Ansatz zu Retraktorbildung. Quermuskulatur als zusammenhängende, auch die Radien durchsetzende Ringmuscularis. In der Leibeshöhle oft Wimperorgane und pulsierende Peritonealsäckchen. Kalkkörper hauptsächlich als Rädchen, sigmaförmige Haken oder als Anker und Platten, die der Fortbewegung dienen. Meist schlammfressende und grabende Tiere. Geschlechtsorgane weit vorn, oft zwitterig.

1. Unterfamilie. Myriotrochinae Östergren 1898. Mit 8- oder mehrspeichigen Rädchen. Myriotrochus, Trochoderma, Acanthotrochus.

2. Unterfamilie. Chiridotinae. Mit 6speichigen Rädchen, sigmaförmigen Haken oder ohne Hautkalkkörper. Fühler händchenförmig. Chiridota, Trochodota, Achiridota usw.

3. Unterfamilie. Synaptinae Östergren 1898. Meist Anker und Ankerplatten, keine Rädchen (wenigstens nicht beim erwachsenen Tier und regelmäßig), Fühler gefiedert oder einfach. Euapta, Synapta, Synaptula (diese beiden mit „Knorpelring" am Kalkring), Leptosynapta, Labidoplax, Anapta, Rhabdomolgus.

2. Ordnung. Actinopoda Ludwig 1891. Mit Radiärkanälen, meist auch mit einigen oder zahlreichen Füßchen. Die Fühler entspringen wie die Füßchen (immer?) von den Radiärkanälen. Quermuskeln unterbrochen.

1. Familie. Elpidiidae Théel 1882. Meist 10 (bis 12) schildförmige Fühler, Füßchen nur

an den seitlichen Radien der oft abgeflachten Bauchseite. Wenige große dorsale Ambulakralpapillen. Keine Saugscheiben an den Füßchen. Mund nicht ganz bauchständig. Darm öfters mit Blindsack. Kalkring oft nur aus 5 Radialia bestehend. Statocysten am Ring- oder an den Radialkanälen vorhanden. Der Steinkanal mündet oft nach außen. Langarmige Kalkkörper meist ohne Maschenbildung, zuweilen Rädchen. Meist Tiefseebewohner. Parelpidia, Elpidia, Kolga, Scotoplanes, Scotoanassa, Achlyonice (11 oder 12 Fühler) (Enypniastes mit 20 Fühlern, hierhin ?).

2. Familie. Deimatidae Théel 1882. Mit 15 bis 20 schildförmigen Fühlern. Füßchen in der Regel in den seitlichen Radien der deutlichen Bauchseite. Ambulakralpapillen auf dem Rücken, zahlreicher als bei Deimatiden, manchmal wie eine Nudibranchierkieme. Kalkring zehngliederig, Mund ganz oder nicht ganz bauchständig. Darm fast nie mit Blindsack. Steinkanal kann nach außen münden. Kalkkörper als Rädchen, Stäbchen oder große Gitterplatten. Ohne statische Organe. Fast alle Tiefseetiere. Deima, Oneirophanta, Laetmogone (Capheira hierhin ?).

3. Familie. Psychropotidae Théel 1882. 10 bis 20 schildförmige Fühler um den ganz bauchständigen Mund. Füßchen oft in allen 3 Radien der wohldifferenzierten Bauchseite, ebenso wie die dorsalen Ambulakralpapillen klein, aber oft zu einem Hautsaum um die Bauchseite oder zu einer Halskrause verbunden. Einige Formen sind Schwimmer. Kalkring mit 5 Radialia. Interradialia durch kleine Kalkkörper ersetzt. Zuweilen mit Darmanhang oder mit dorsalem hinterem, von Füßchen gebildetem Körperanhang. Mit großen kreuzförmigen Kalkkörpern. Ohne Statocysten und Rädchen. Ausgesprochene Tiefseeformen. Psychropotes, Euphronides, Benthodytes usw.

4. Familie. Pelagothuriidae Ludwig 1894. Mit 13 bis 16 gegabelten Fühlern und Radiärkanälen, aber nur 5 Analpapillen am Hinterende des einfachen glatten Körpers. Ohne Kiemenbäume. Hinter dem Tentakelkranz um den ganzen Körper oder nur dorsal eine Reihe von Fortsätzen, die bei natatrix den Fühlern in der Zahl entsprechen, bei anderen Arten aber zahlreicher sind und als Fühlerampullen oder aber als Füßchenhalskragen gedeutet worden sind. Sie sind durch Haut zu einer Schwimmscheibe verbunden. Der Porenkanal öffnet sich nach außen. Alle Kalkkörper sowie der Kalkring fehlen. Pelagothuria natatrix, bouvieri. In die Nähe von Pelagothuria, die Beziehungen zu Psychropotiden zeigt, gehört vielleicht Enypniastes mit großem dorsalem Segel, dessen Füßchen vom Ringkanal ausgehen sollen.

5. Familie. Synallactidae Ludwig 1894. Mit etwa 10 bis 20 schildförmigen Tentakeln, Füßchen mehr oder weniger regelmäßig längs der Radien oder verschiedenartig ausgebildet, sie können im m. a. I. fehlen. Die Synallactiden unterscheiden sich von den vorhergehenden Gruppen durch das Auftreten von Kiemenbäumen, die allerdings noch nicht wie bei den

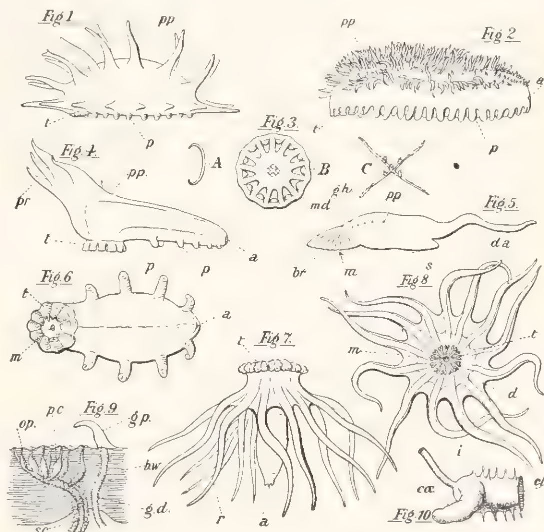


Fig. 28. Organisationsverhältnisse von Elasipoden usw. 1 Deima validum Théel. 2 Ilyodaemon maculatus Théel, beide von links. 3 A C-förmiges Kalkkörperchen von Scotoplanes albida Théel; B Rädchen von Pannychia moseleyi Théel; C vierarmiges Spiculum von Elpidia rigida Théel. 4 Peniagone wyvilli Théel. 5 Psychropotes longicauda Théel. 6 Elpidia glacialis Théel. Alle nach Théel. 7 bis 8 Pelagothuria natatrix Ludwig, seitlich und oral. Nach Ludwig. 9 Madreporit und Genitalpapille von Ilyodaemon maculatus. Nach Théel. 10. Intestinum (i), Kloake (cl) und Blindsack (coe) von Benthodytes sanguinolenta Théel. Nach Ludwig. a After, br Halskrause, bw Körperwand, d Mundfläche, da Dorsalanhang, gd Genitalgang, gh Geschlechtsöffnung, gp Geschlechtspapille, m Mund, op Oeffnung eines Porenkanals pc, p Füßchen, pp Ambulakralpapille, pr vorderer Fortsatz, r Strahl der Scheibe, s Kriechsohle, sc Steinkanal, t Tentakel. Aus Goodrich.

Holothuriiden mit dem Blutgefäßsystem in engere Verknüpfung getreten sind. Freie Fühlerampullen fehlen. Der Steinkanal ist meist noch an die Körperwand angelötet. Einige Formen scheinen zu den Psychropotiden hinüberzuweisen (Paelopatides, Benthothuria), andere schließen sich in dem Besitz nur eines linken oder zweier Gonadenbüschel den Holothurinae bezw. den Stichopinae eng an (Zygothuria, Mesothuria, Gastrothuria oder Pseudostichopus?). Die Längsmuskeln können einfach oder getrennt sein, und auch die Kalkkörper zeigen in dem Uebergang von Stühlchen zu vierarmigen Kreuzen den Weg von Aspidochiroten zu den Elasipoden, zu welchen man die bisher genannten Familien der Actinopoden mit oder ohne Einschluß der Pelagothuria und Synallactiden zusammengefaßt hat. Fast alle Tiefseeformen außer den genannten gehören hierhin: Meseres, Bathyplotes, Allantis usw. Dendrothuria mit verzweigten Fühlern.

6. Familie. Holothuriidae Ludwig 1894. Aspidochirotae. Mit 20 bis 30 schildförmigen Fühlern, Endscheiben tragenden Füßchen und Ambulakralpapillen. Das kompliziert gebaute Madreporenköpfchen von der Körperwand abgelöst, große freie Fühlerampullen vorhanden. Die linke Kieme in enger Verflechtung mit dem Wundernetz. Keine Rückziehmuskeln, aber geteilte Radiärmuskeln. Die typischsten Kalkkörper sind meist 4strahlige Stühlchen. Keine Tiefseeformen, meist Küstentiere wärmerer Meere.

1. Unterfamilie. Holothuriinae Perrier 1902. Mit nur einem linksseitigen Genitalbüschel und oft mit Cuvierschen Organen. Holothuria, Labidodemas, Mülleria. Gastrothuria mit Fühlerendscheibchen, aber freiem Kiemenbaum und sehr deutlicher Kriechsohle führt auf dem Wege Mesothuria-Zygothuria zu den Synallactiden.

2. Unterfamilie. Stichopinae Perrier 1902. Mit 2 Genitalbüscheln und (immer?) ohne Cuviersche Organe.

7. Familie. Molpadiidae J. Müller 1850. Meist 15 (bei Ceraplectana 10) einfache oder mit seitlichen Fingern besetzte Fühler mit Fühlerampullen. Radiärkanäle vorhanden, aber nur mit wenigen analen Papillen versehen. Radiärmuskeln geteilt, Kiemenbäume mit dem Wundernetz verbunden. Ohne Statocysten und Wimperorgane. Madreporenköpfchen frei. Kalkring oft mit Gabelschwänzen. Kalkkörper als Gitterplatten, durchbrochene Stäbe, Löffel und Anker, Stühlchen usw. sehr oft 3strahlig gebaut. Mund und After endständig. Oft Phosphatkörper. Körper eiförmig mit mehr oder weniger langem Schwanzfortsatz, der von den schlammfressenden Tieren an der Oberfläche bleibt, um die Wasserzufuhr zu den Kiemen zu ermöglichen. Molpadia (Ankyroderma), Caudina. Acaudina ohne Schwanz. Eupyrgus, Himasthlephora und Gephyrothuria entbehren der Fühlerampullen, der Gabelschwänze, der Kiemenwundernetzverflechtung und haben einfache Radiärmuskeln. Die beiden letzteren Gattungen besitzen noch große Ambulakralpapillen auf dem Rücken, sie leiten also wohl zu den Stammformen über.

8. Familie. Cucumariidae Ludwig 1894 = Dendrochirotae Grube 1840. Mit 20 bis 30 oft ungleich großen, baumförmig verzweigten Fühlern, nur mit Andeutung von Ampullen. Typische Füßchen, seltener Papillen. Körper rund, 5kantig oder mit Kriechsohle. Kalkring 10teilig, oft mit Gabelschwänzen versehen und in kleine Stücke zergliedert. Längsmuskeln meist einfach, Retraktoren meist vorhanden. Kiemenbäume vorhanden. Geschlechtsschläuche links und rechts. Typische Kalkkörper sind die knotigen Schnallen, Näpfchen und Gitterkugeln. Die Tiere sind Planktonfresser. Dritter Darmschenkel oft im l. a. J. statt im r. a. J.

1. Unterfamilie. Cucumariinae Östergren 1907. Mit 10 (8) Fühlern. Cucumaria, Thyone.

2. Unterfamilie. Phyllophorinae Östergren 1907. Mit 15 bis 30 Fühlern. Phyllophorus usw.

3. Unterfamilie. Psolinae Perrier 1902. Mit Kriechsohle. After und Mund dorsal verschoben. Dritter Darmschenkel in normaler Lage. Psolus, Théelia usw.

4. Unterfamilie. Rhopalodininae Ludwig, Perrier 1902. Mund und After zusammen auf demselben Körperfortsatz. Radien geknickt und scheinbar in 10-Zahl. Retraktoren fehlen. Rhopalodina.

2. Echinoidea. a) Allgemeines. Die Seeigel verdanken ihren Namen den zahlreichen Stacheln, die in verschiedenster Größe und Form den Körper bedecken. Besondere, wahrscheinlich statische Sinnesorgane der Mundgegend und die zahlreichen eigentümlichen Greif- und Giftzangen, die Pedizellarien, stellen wahrscheinlich umgebildete Tentakel und Tentakelgruppen dar. Der Körper der Echinoiden ist kugelig, herz- oder scheibenförmig. Zahlreiche, meist fest miteinander verbundene Kalkplatten seiner Körperwand (Cutis) bilden eine regelrechte Schale, die nur ein weicheres Mund- und Afterfeld (Peristom und Periprokt) freiläßt. Das Apikalskelett ist klein und wird nur durch 5 interradiale Platten gebildet, die man mit den Pelmatozoen-Basalia homologisiert und auch ebenso genannt hat. Da sie oft die interradialen Genitalöffnungen (sekundär) in sich aufnehmen, werden sie auch als Genitalia bezeichnet. Eines derselben trägt meist die Mündung des Porenkanals, die gewöhnlich durch zahlreiche Oeffnungen geschieht, welche sich auch auf benachbarten Platten finden können. Das Oralskelett besteht aus oroapikalen Plattenreihen, die sich bis an die Genitalia heran erstrecken und nach dem Vorhandensein oder Fehlen von Füßchenporen und nach ihrer radialen oder interradialen Lage als Ambulacralia (Amb) und Interambulacralia (iAmb) bezeichnet (nicht aber mit den Ambulacralia der Asteroiden homologisiert) werden. Oft ist ein komplizierter Kauapparat vorhanden, dessen Muskeln zu einem großen Teil an besonderen Apophysen des Peristomrandes, den Aurikeln, ansetzen. In der Mitte des Peristoms liegt der Mund, er kann bei fehlendem Kauapparat in den linken poralen Radius, den man dann als vorderen bezeichnet, verschoben sein. Der After liegt meist rechts antiporal und radial im Periprokt, das beim jungen Tier oft mit einem (Centrodorsale ??), beim alten mit zahl-

reichen kleinen Plättchen versehen ist. Oft verläßt der After den apikalen Skelettring und wandert dann in den rechten antiporalen Interradius, bleibt also, trotz der verschiedenen Richtung seiner Verschiebung, in der Meridianebene, an die auch der Mund bei Verschiebung gebunden ist und die als „Lovensche Symmetrieebene" bezeichnet wird. Die Ordnung der Buccal- und Peristomrandplatten weicht von der Radiärsymmetrie unauffällig ab (Lovén), ist aber fast bilateralsymmetrisch zu einer auch im Apicalskelett nachweisbaren Symmetrieebene im r. p. R. (v. Ubisch). Der Ringkanal des Wassergefäßes liegt auf dem Kauapparat, er entbehrt echter Polischer Blasen; die Radiärkanäle enden in kleinen Endtentakeln, die durch ein Loch der Ocellarplatten nach außen treten. Die Nahrungsfurchen sind geschlossen, das in die Tiefe (unter die Schale) gesunkene ambulakrale Nervensystem wird dafür von einem Epineuralkanal begleitet. Das apikale Nervensystem und meist auch das tieferliegende orale fehlen fast ganz, letzteres wohl deshalb, weil bei der Unbeweglichkeit der Schale die Muskulatur der Körperwand im allgemeinen rückgebildet ist. Radiäre Sinus sind vorhanden, ihre fehlende zentrale Verbindung wird wahrscheinlich durch einen großen Sinus des Kauapparates repräsentiert. Vom pentagonalen aboralen Sinus bezw. seinem anliegenden Genitalstrang gehen die 5, später isolierten, einfachen, interradialen Geschlechtsorgane aus.

Skelett. Die Genitalporen werden erst spät gebildet und dann durch Weiterwachsen in die Basalia aufgenommen; bei einigen Arten der Gattungen Laganum, Encope, Mellita, bei ♀ von Austrocidaris canaliculata und spinulosa (nach Mortensen) bleibt die Oeffnung immer am Außenrand der Basalia, bei anderen liegt sie noch weiter interradial (Goniopygus), und bei Clypeaster rosaceus haben sich einige Interambulacralia eingeschoben. Bei Echinocyamus ist nur ein Madreporus vorhanden, meist finden sich zahlreiche Poren auf einem Buckel des Basale im m. p. I. Bei den Gattungen Echinoconus und Micropedina usw. kommt Ausbreitung der Poren auf mehrere BB vor, zuweilen erhalten auch Terminalia (Hemipneustes; bei Arbacia crassispina Poren auf m. u. l. p. Basale und auf l. p. Terminale, bei Notechinus magellonicus auf dem r. p. B u. Term.) oder sogar Platten des Oralskelettes (Clypeastriden) einige Poren.

Die Terminalia sind fälschlich mit den Pelmatozoenradialia verglichen worden. Das Durchtreten des Endtentakels zeigt, daß sie Terminalia sind. Sie werden häufig als Ocellarplatten bezeichnet, ein Auge fehlt aber dem Endtentakel, höchstens ist ein Pigmentfleck vorhanden.

Bei Tiarechinus (Trias), Podocidaris (rez.) und Pygmaeocidaris (rez.) und in noch höherem Maße bei Lysechinus (Trias) dehnt sich der Komplex der Basalia und Terminalia sehr stark, bei Lysechinus bis über die Schalenmitte aus. Umgekehrt bilden sie bei Aspidodiadematidae und bei Austrocidaris canaliculata und spinulosa einen einzigen Ring (auch bei Tretocidaris bartletti und gelegentlich bei Cidaris abyssicola var. teretispina sind die Terminalia in Kontakt mit dem Periprokt) und fallen bei Asthenosoma mehr oder weniger vollkommener Rückbildung anheim. Bei Echinocystis fehlt das Apikalsystem, Mund und After liegen im m. p. I.

Das Apikalsystem heißt endozyklisch, wenn der After von dem Apikalsystem umgeben im Periprokt liegt. Das Periprokt weist bei Larven und dauernd bei Salenia nur eine Platte auf, die den After bei Seite drückt und seine Abweichung in den rechten vorderen Radius bedingt. Bei Acrosalenia sind die Periproktplatten groß, dick und außen fest mit den Basalia verbunden. Meist sind zahlreiche, außen größere Plättchen vorhanden, gelegentlich findet man nur 5 anale Platten (z. B. Aspidodiadema sp., Pygmaeocidaris), bei anderen nur 4 (Arbacia) usw.

Das Apikalsystem wird „exozyklisch", wenn der After und mit ihm das Periprokt in den r. a. I. rückt, dort von außen dem entsprechenden Basale anliegt (z. B. Pygaster umbrella), dasselbe mit sich in die Länge zieht (Clypeus sinuatus) oder vom Apikalskelett ganz getrennt wird (Clypeus hugi). Dabei bewahren merkwürdigerweise nur die 3 analwärts liegenden BB ihren Kontakt, während auf der entgegengesetzten Seite das l. und r. p. und das l. a. Terminale in den Basalkranz rücken (z. B. Zeugopleurus usw.). Die Periproktlücke bei exozyklischen Formen wird durch die sich vergrößernde Madreporenplatte gefüllt (die meist mit dem m. p. B. zusammenhängt und mit allen Basalia verschmelzen kann, Clypeatriden) „ethmophraktes" Apikalsystem, Holectypus, Disoidea). Die porentragende Platte kann sich noch weiter ausdehnen, dem After nach dem r. a. I. zu folgen und dabei den Apikalkranz zerteilen (ethmolysisch, z. B. Spatangus purpureus) und das r. a. B. mit seinem zugehörigen Genitalorgan und Porus zum Wegfall bringen. Bei Tripylus fehlt auch noch der Genitalporus des m. p. B., und bei Schizaster bleiben nur 2 asymmetrische Poren (im r. d. u. l. v. I.). Bei Verlängerung der Schale in Mund-Afterrichtung kann eine entsprechende Verlängerung des Apikalfeldes eintreten, wobei die 4 Genitalia und ebenso 4 Terminalia paarweise zusammentreten und in diesen Paaren in der Symmetrieebene abwechselnd aufeinanderfolgen, so daß in der Richtung: lpR — raI die Anordnung:

	m. p. B.	r. p. Term.	r. p. B.	r. a. Term.
l. p. Term.	l. p. B.	l. a. Term.	l. a. B.	m. a. Term.

entsteht (Holaster, Collyrites). Bei Collyrites ist das letzte Paar Terminalia weit abgerückt, auch bei Pourtalesia treffen sich die beiden benachbarten, dem Boden zugewendeten Radien (der r. und m. antiporale) selbständig im Afterinterradius.

Die Platten der Corona, d. h. des außerapikalen Skeletts, sind im allgemeinen unter sich und mit dem letzteren fest verbunden. Nur bei den Echinothuriden (und bei Lepidocentridae und Archaeocidaridae) sind die Platten gegeneinander beweglich und dachziegelförmig

übergreifend, wobei in den Interradien die Mund-, in den Radien die Afterenden der Platten die bedeckten Teile sind. Bei der Gattung Asthenosoma sind 5 Paar starke zusammengesetzte radiäre Muskeln vorhanden, die von den Aurikeln bis zu den Terminalia laufen. Bei den Temnopleuridae sind die Suturen grubig vertieft, und die Platten können unterminiert werden.

Jeder Interradius kann 1 (Bothriocidaris aus dem Ordovician und viele junge Echinoiden nahe an den Polen der Schale, Clypeastriden und Spatangiden am Peristomrand), 2 (Mehrzahl aller Echinoiden) oder mehrere (Cystocidaroida, Lepidocentridae, Archeaocidaridae, Tetracidaris mit 4) Reihen von Platten in einem Interambulacrum aufweisen. Die einzelnen Platten können einen oder mehrere („uni- bis multituberculat“) Stachelhöcker mit oder ohne zentrale Vertiefung, seitliche Furchen usw. tragen und sonstwie verschieden sein. Auch die ambulakralen Platten können in 2 oder mehreren Reihen (einige cidaroidenartige, besonders Melonitoida) auftreten und verschieden bestachelt sein. Bei Palaeodiscus und meist in den petaloiden Ambulacren der Clypeastriden treten auf der Oralfläche die Füßchen zwischen den Ambulakralien durch, sonst durchsetzen sie immer die Platten selbst und zwar meist mit einem Doppelporus, durch den eine doppelte Verbindung von Füßchen und Ampulle hindurchführt (Zygoporen). Einfache Azygoporen kommen in den außerpetaloiden Regionen der Clypeastriden (und Spatangiden) vor und können sich auf radialen „Actinal“-Furchen (einfach bei Clypeastridae, gegabelt bei Scutellidae), wo sie sehr dicht stehen, in geringerer Zahl über die Interambulacralia bis zu deren Suturen hin ausdehnen. Die neuen Ambulacralia werden immer vor den Terminalia eingeschoben, sie sind dort immer einfache Primärplatten mit einem Doppelporus. Sie bleiben im ganzen Radius solche Primärplatten vom „cidaroiden Typus“, wo das Fehlen ambulakraler Aurikeln dem Fortrücken der alten Platten nach dem Mund zu keinen unüberwindlichen Widerstand entgegensetzt (Cidaridae, Orthopsinae). Bei geschlossenem perignathischem Gürtel werden gewöhnlich mehrere Platten in meridionaler Richtung zu zusammengesetzten Platten zusammengedrückt, wodurch das Mißverhältnis der großen Breite zur kleinen Höhe der Platten (das zumal am Schalenäquator auftritt) gemildert wird. Bei dem „diademoiden Typus“ verschmelzen 3 Platten, die jedoch Primärplatten bleiben, d. h. noch immer die Breite des halben Interradius einnehmen. Bei der Verschmelzung können aber auch einzelne Platten zu Halbplatten oder zu isolierten Platten (Echinothuridae, Melonitidae) werden, indem sie kleiner werden und die Innenseite bezw. Innen- und Außenrand des Halbradius nicht mehr erreichen. Bei dem „echinoiden“ Plattentypus stellt die innere, bei dem „arbacioiden“ Typus jede der beiden äußeren Teile einer 3teiligen Platte eine Halbplatte dar. Bei der polyporen Platte vom „cyphosomoiden“ Typus sind in einer zusammengesetzten Platte zahlreiche Konstituenten vorhanden, von denen

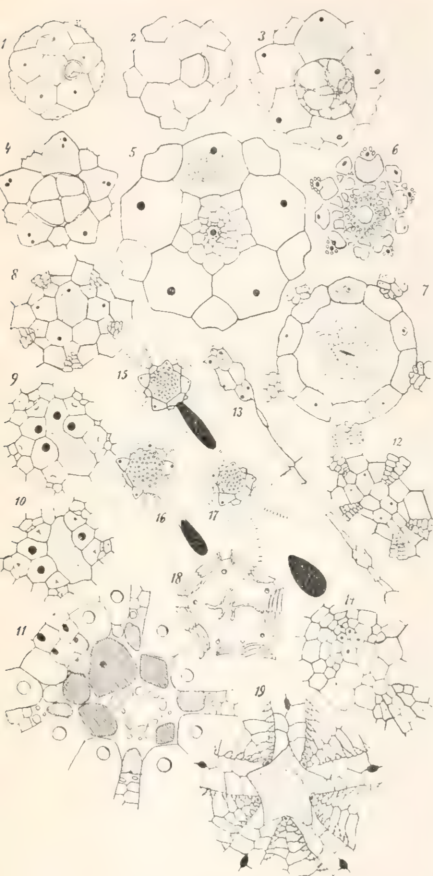


Fig. 29. Seeigelapikalsysteme, der m.p.I immer nach oben gerichtet. 1 Von Salenia varispina. Nach Lovén. 2 Strongylocentrotus droebachiensis O.F.M. Nach Lovén. 3 Strongylocentrotus lividus (Lam.). Nach Jackson. 4 Arbacia punctulata (Lam.). Nach Jackson. 5 Cidaris abyssicola (A. Agass.). Nach Mortensen. 6 Asthenosoma urens Sar. Nach Sarasin. 7 Aspidodiadema microtuberculatum A. Ag. Nach Agassiz. 8 Holectypus depressus Cotteau. Nach Lovén. 9 Spatangus purpureus. Nach Lovén. 10 Abatus (Tripylus) cavernosus Phil. Nach Lovén. 11 Abatus cavernosus juv. Nach Mortensen. 12 Holaster suborbicularis Defr. Nach Lovén. 13 Collyrites elliptica Lam. Nach Lovén. 14 Pourtalesia jeffreysi W. Th. Nach Lovén. 15 Pygaster umbrella. Aus Gregory. 16 Clypeus sineatus. Aus Gregory. 17 Clypeus hug. Aus Gregory. 18 Laganum depressum Less. Nach Lovén. 19 Clypeaster rosaceus L. Nach Lovén. Eigene Zusammenstellung.

die inneren Halbplatten sind (Fig. 30, 1 bis 5). Bei zweireihigen Ambulakren und Interambulakren wird die Grenze zwischen diesen Regionen gewöhnlich ziemlich geradlinig, während die Trennungslinie der radialen und interradialen Platten unter sich zickzackförmig wird, so daß jede einzelne Platte Fünfecksform annimmt.

Sowohl Ambulakral- als auch Interambulakralplatten können sich bis auf das Peristom fortsetzen (mehrere interamb. und amb. Reihen bei Cidaridae, Archaeocidaridae, Diplocidaridae, eine interambulakrale Reihe bei Palaeechinidae und Melonitidae). Wenn auf dem Periostomfeld 5 Paar Buccalfüßchen stehen, so durchsetzen sie 10 entsprechende dort liegende einfache Ambulakalplatten.

Bei Clypeastriden verlaufen die Doppelporenreihen in jedem Radius vom Apikalpol aus erst auseinander, um sich nach bogenförmigem Verlauf wieder zu nähern. Solche Ambulakren bezeichnet man als petaloid, weil durch sie die Figur einer Blüte mit 5 Blättern entsteht, von denen sich das im l. p. R. (symmetrisch) gelegene oft durch Größe auszeichnet. Auch bei Spatangiden treten petaloide Ambulacra auf; außerdem kann sich am oralen Pol eine ganz entsprechende Umbildung der Ambulakren zu einer „Floscelle" finden mit 5 großporigen, von 5 radialen Wülsten getrennten „Phyllodien" (Cassiduliden). Die Schale der Clypeastriden weist noch andere Besonderheiten auf: von den ambulakralen Platten wachsen apophysenartig Säulen nach innen, die am Rande der meist ganz flachen Schale sich von beiden Seiten her treffen und Verbindungen zwischen der dorsalen und ventralen Plattenhälfte (dem Ambitus) darstellen können (Scutella, Mellita). In anderen Fällen entstehen neben dem Radiärkanal zwischen den Füßchenampullen lange senkrechte Kalkwände, die nach innen zu wieder eine der Schale parallele Wand entwickeln und so eine Gallerie in den Ambulakren bilden können. Bei ganz flachen Formen kann der Schalenrand auch starke Einbuchtungen zeigen, die sich bei einigen Formen zu randständigen Löchern („Lunulae") schließen können (Rotula, Mellita, Monophora). — Bei Spatangiden kommt es im r. a. I. zur Bildung eines „Sternums". Auf die erste unpaare interradiale Platte, die hier etwas vorspringt und als Labrum bezeichnet wird, folgen die beiden Sternalplatten, die entweder schräg gegeneinander vorspringend aufeinander folgen (meridosterne Formen: Holaster, Echinocorys) oder als langgestreckte Platten nebeneinander liegen und beide das Labrum berühren (amphisterne Formen wie Toxaster und Spatangus). Bei Atelostomen hinterlassen besonders gehäufte kleine Stachel auf der Schale bandförmige Streifen, die „Fasciolen", die „intern" (d. h. die Petaloide kreuzend), „peripetal", marginal, subanal (d. h. einen Raum, das „Plastron" neben dem Anus einschließend) oder doppelt lateral sein können (d. h. jederseits von der peripetalen Zone zum Anus zu laufend). Ansätze dazu finden sich schon bei Phormosoma.

Am Mundfeldrand erfahren die Koronaplatten bemerkenswerte Umbildungen durch den Ansatz von Muskeln für den Kauapparat. Bei Cidaroiden finden sich zwei benachbarte Apophysen auf den Interradialia des Peristomrandes. Bei Salenia sind dieselben niedrig,

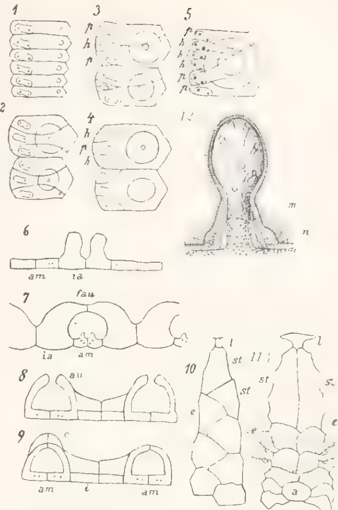


Fig. 30. 1 bis 5 Ambulakralplattentypen, 1 cidaroider, 2 diademoider, 3 echinoider, 4 arbacioider, 5 cyphosomoider Typus. 6 bis 9 Typen von perignathischen Gürteln und Aurikeln. 6 Nicht geschlossene interambulakrale Aurikel von Cidaris, 7 geschlossene interradiale Aurikel von einem Cidoroiden, 8 offene ambulakrale Aurikel von Salenia, 9 geschlossene ambulakrale Aurikel ohne (Diadema) oder mit kappenförmigem Aufsatz (Echniometra). 10 Meridosterner (Echinocorys scutatus), 11 amphisterner (Spatangus purpureus) Brustbeintypus. 12 Schema einer Sphaeridie. p Primär-, h Halbplatte, am ambulacralia, ia Interambulacralia, au Aurikel, f au falsche (ia) Aurikel, c Kappe, st Sternumplatten, e Episternum, l Unterlippe, a After, m Muskel-, n Nervenlage. Eigene Zusammenstellung. Fig. 7 nach Lang; Figur 1 bis 6 und 8 bis 11 nach Gregory. Figur 12 Original.

dafür lehnt sich an ihre Außenseite je ein gekrümmter dünner Fortsatz der Ambulacralia. Diese ambulakralen Fortsätze krümmen sich über dem Radius aufeinander zu, verschmelzen häufig zu einer geschlossenen Aurikel (Diadematidae, Echinidae), deren Oberende bei Echinometra noch durch 2 aufgewachsene Kalkkappen verstärkt wird. Den Atelostomen fehlt mit den Kiefern auch der perignatische Gürtel, bei den holectypinen Gnathostomen kann man eine allmähliche Rückbildung des Gürtels beobachten: erst werden die ambulakralen Fortsätze klein und verlieren den Konnex (Discoidea, Pygasteridae), um schließlich zu verschwinden (Galerites), bei Discoidiidae und Conoclypeidae ist der Gürtel röhrenförmig.

Kauapparat. Der bei den Atelostomata verloren gegangene (z. B. bei Echinoneus

semilunaris in der Jugend gut ausgebildete und später resorbierte) und auch bei Holectypinen (Galeritinen) stark rückgebildete Kauapparat besteht bei höchster Entwickelung aus 35 Kalkstücken, Plinius gab ihm wegen der Aehnlichkeit mit einer 5eckigen, nach oben erweiterten Laterne den Namen „Laterne des Aristoteles". Sie enthält 5 interradiale, nach innen konvexe, unten zusammentreffende Zähne, die außen eine dünne, harte schmelzartige Lage und an der Innenseite eine komplizierte oft T-förmig gekielte dentinähnliche Blätterschicht aufweisen, an ihrem oberen Ende sind sie etwas eingekrümmt und weich. Jeder Zahn ist in seiner Mitte in einer Furche nach innen von der interradialen Sutur zweier Kiefer durch Fasergewebe befestigt. In den Radien sind die Kieferpaare verschiedener Interradien durch starke Muskulatur verbunden, die an großen, weit nach innen vorspringenden Flächen ansetzt. Ueber der Ansatzstelle der Zähne stehen die Enden der Kieferpaarlinge auseinander, werden aber von 2 bogenförmigen Stücken (Arcus) überlagert und oft (Echinidae u. a.) durch deren Zusammentreffen überbrückt, wodurch die interradialen Foramina externa der Laterne entstehen. Von den Bogenstücken gehen große Muskeln zu interradialen Teilen des perignathischen Gürtels, die die Kiefer mitsamt den Zähnen vorziehen können. Große Retraktoren verlaufen von den Oberenden der Aurikeln paarig zu den Kieferunterenden, welche beim Anziehen dieser Muskeln zurück- und auseinandergezogen werden. Halb auf, halb zwischen den oberen radialen Enden der Kiefer und Arcus liegen wie die Speichen eines Rades 5 Rotulae oder Zwischenkiefer. Sie bilden die Gelenke für die Auswärtsbewegung und Rollen für gegenseitige oro-apicale Verschiebung der Kiefer. Die Kieferpaare können also sowohl einzeln als auch zusammen vor- und zurückgeschoben werden, wobei das Zurückziehen mit Oeffnung, das Vorschieben mit Zusammenrücken (Zubeißen) der Zähne verbunden ist, weil die Protraktoren an den Arcus, also jenseits der Hebelachse (Rotulae) ansetzen. Ueber den Rotulae und mit ihnen am Innenrande gelenkig verbunden verlaufen nochmals 5 (noch aus je einem zentralen und peripheren Stück zusammengesetzte) dünne, am peripheren Ende gegabelte Stücke, von deren Gabelästen lange dünne Muskeln zu den Interradialpunkten des perignathischen Gürtels verlaufen. Diese Muskeln drücken bei Kontraktion das periphere Gabelstückende auf die Gabelblasen der Kiefersinus und pressen damit Flüssigkeit in die Peristomkiemen. Ob sie beim Arbeiten der Kiefer helfen, steht nicht fest. Die Gabel- oder Kompaßstücke werden durch 5, ein Fünfeck bildende Muskeln zwischen den Kompassen in der Membran des Kauapparatsinus wieder gehoben. Mitten durch die Laterne zieht der Oesophagus. Bei den flachen Clypeastriden wird der Kauapparat ganz niedrig, die Kiefer legen sich flach und artikulieren direkt mit den offenen ambulacralen Aurikeln, die aber interradiale Paare bilden, so daß sie gehoben und gesenkt werden können. Arcus und Zwischenkiefer sind rudimentär, die Gabelstücke fehlen ganz.

Stacheln. Die absolut und relativ längeren (Cidariden, Saleniiden) oder kürzeren Stacheln können die verschiedensten Formen annehmen keulenförmig bei Echinus mamillatus, pflastersteinartig bei Colobocentrotus, spatelförmig (oft bei Spatangiden) pilzhutförmig bei Aceste, becherförmig erweitert bei Phormosoma usw.). Sie werden nach ihrer Größe bei den einzelnen Tieren als primäre, sekundäre und tertiäre unterschieden, denen entsprechende Stachelhöcker der Schalenplatten zugehören, die feinsten Höckerchen derselben werden als hirsenförmige Wärzchen bezeichnet. Kleine keulenförmige, mit Wimperepithel am Stiel versehene Stacheln, sogenannte „Clavulae", besetzen dicht gedrängt die Fasciolen. An ihrem Unterende tragen die Stacheln eine Gelenkgrube, etwas darüber läuft ein Ringwulst um den Stachel, er dient zum Ansatz der Stachelmuskulatur, die sich von hier nach dem erhöhten „Höfchenrand" hinzieht, der den Stachelhöcker umgibt. Die Muskulatur besteht aus einer äußeren durchsichtigen Schicht für die langsamen Bewegungen und einer inneren weißlichen nur langsam erregbaren Sperrmuskulatur, deren lang anhaltender Tonus nach starker Reizung jede weitere Bewegung hemmen und den Stachel so fest setzen kann, daß er eher bricht als nachgibt. Die Bewegungsmuskulatur ist leichter und schneller erregbar, kontrahiert sich auf der Seite, von der der Reiz herkommt, am stärksten und bewirkt dadurch ein Hinkrümmen der Stacheln nach der Reizstelle. Bei stärkerem Reiz tritt dagegen Abwendung auf, weil durch schnellen Tonusfall in den Nerven der Reizseite die Muskeln dieser Seite erschlaffen und die der gegenüberliegenden Seite übermächtig werden. Durchschneidet man den Hautnervenplexus zwischen Reizstelle und Stachel, so wendet er sich nach der anderen Seite, weil der Reiz nun von dort eintritt. Verlängerung der Muskulatur zieht geringeren Tonus, aber größere Aufnahmefähigkeit für Reize nach sich. Die gestreckte Muskulatur an der einen Seite eines durch eigenes Gewicht oder durch einen Fremdkörper schiefgestellten Tentakels wird also bei Reizung sich gerade am stärksten kontrahieren und eine fortwährende, meist etwas kreisende Bewegung (etwa 1 Dutzend Rückenstacheln von Centrostephanus longispinus) nach sich ziehen, weil jede Bewegung ein anderes Ende der Muskulatur empfindlicher macht. Ein Fremdkörper wird auf andere Stacheln abgeschoben, und auf diesem nicht nervösen Wege kann die Reaktion fortgepflanzt werden. Auch Eigenbewegungen des Tieres mit den Stacheln und Umkehrbewegungen sollen so erklärlich sein. Das Zentralnervensystem spielt dabei nur die Rolle eines Tonusreservoirs (v. Uexküll).

Am Grunde der Stacheln läuft an der Basis des Epithels ein mit dem Hautnervenplexus zusammenhängender Nervenring. Das Stachelepithel kann sehr drüsenreich und bis zur Spitze bewimpert sein (Nebenstacheln von Dorocidaris papillata), gewöhnlich wird das Epithel der Spitze jedoch abgerieben. Die Echinothuriden (Asthenosoma) besitzen Giftstacheln, die an der Spitze von einem (lose Bläschen (Zellen?) enthaltenden) Giftbeutel und weiter von Muskulatur umgeben sind, bei deren Kontraktion die Spitze entblößt und das Gift durch Stachelhohlräume und ihre Oeffnungen an der Spitze entleert wird.

Die Kalksubstanz der Stacheln wird oft durch radiäre kompakte Kalkmassen verstärkt, wobei

mannigfache zierliche Anordnungen entstehen. Im Innern bleiben zahlreiche Stacheln sehr weitmaschig oder hohl, d. h. bindegewebig (Scutelliden), häufig sind Stacheln und Gelenkhöcker durch ein zentrales bindegewebiges Band verbunden (Diadematiden, Cidariden), wobei dann das Skelett an den Gelenkhöckern ein zentrales Loch erkennen läßt. — Die Stacheln können sich von den Ambulakral- und Interambulakralplatten aus noch auf andere Stücke ausdehnen, z. B. auf die Platten des Apikalsystems und der Peristommembran. Oft findet man auf jeder radialen und interradialen Plattenreihe eine meridionale Reihe von Primärtentakeln.

Sphaeridien. Diese auf die ambulakralen Platten beschränkten, wahrscheinlich statischen Sinnesorgane stellen kleine, ungefähr kugelige, kurz gestielte, modifizierte Stacheln dar, die auch einen basalen ganglionären Nervenring besitzen und durch Muskulatur bewegt werden können (Fig. 30, 12). Bei verschiedener Stellung des Tieres scheinen sie verschiedene Lage einzunehmen und Sensationen darüber zu vermitteln. Die glasige Kalkmasse der Sphaeridien wird nur von wenigen großen, außen mündenden und von Binde- oder Skelettgewebe ausgefüllten Kanälen durchzogen (Fig. 30, 12).

Die Sphaeridien stehen gewöhnlich in Peristomnähe, dehnen sich aber bei Echinothuriden und Aspidodiadematinen bis auf die Apikalseite aus. Arbacia und Echinocyamus haben nur 5, die Cidariden gar keine Sphaeridien. Bei Spatangiden stehen sie an der Basis der Mundfüßchen in Gruben, die bei Cassiduliden und Clypeastriden zu geschlossenen Cysten werden (in denen die Gebilde senkrecht herabhängen).

Pedizellarien. Die Pedizellarien der Seeigel bestehen meist aus 3 (selten 2: Porocidaris purpurata, Hemiaster cavernosus, 4: Schizaster canaliferus, Phormosoma, Araeosoma und Pourtalesia, 5: Salenia hastigera, Lovenia cordiformis, Gymnopatagus valdiviae oder gar 8: Brissopsis atlantica?) kieferartigen Kalkstücken mit innerer Längsgrube und scharfen mehr oder weniger gezähnten Rändern, die nicht wie bei Seesternen auf einer Basalplatte, sondern gegeneinander artikulieren. Sie stehen auf einem Stiel, der von einem auf der Schale gelenkig befestigten Kalkstab ganz oder bis zur halben Höhe gestützt und durchzogen wird. Das Zugreifen der Zangen wird durch 3 die Innenseite der Unterenden gegenseitig verbindende Muskeln bewirkt. Diese Muskeln setzen an einer vorspringenden queren Apophyse an, welche die Längsgrube in 2 teilt, von denen die kleinere untere nochmals durch einen Kalkwulst längsgeteilt ist. Muskeln, die von der Außenseite der Stachelbasen zum Stiel laufen, können das Pedizellarienköpfchen neigen (Giftzangen), und sie öffnen die Zangen, worin sie bei den „Giftzangen" noch durch 3, die äußersten Basalenden untereinander verbindende Muskeln unterstützt werden. Die Pedizellarien sind von Wimperepithel überzogen, das Sinneszellen enthält. Im Stiel findet sich ein Nervenzentrum, das die Zu- und Abwendung der Organe zu Reizen (ähnlich wie bei Stacheln) reguliert; ein Zentrum des Köpfchens leitet das Oeffnen und Schließen der Zangen. Auf eigene Stacheln beißen die Pedizellarien eines Tieres nur ein, wenn durch Kochen das „Autodermin", das die Organe sonst lähmen soll, entfernt worden ist.

Man unterscheidet 4 Arten von Pedizellarien: 1. Die Pedicellariae globiferae oder gemmiformes, Giftzangen, sind große etwa 1 cm lange, an den freien Kieferenden (außer bei Stomopneustes und Caenopedina) mit Terminalzahn und an der Innenseite der Kiefer mit 1 (oder 2 Echinus acutus) Sinnespapille versehen. Sie sind die einzigen Pedizellarien mit bis zum Köpfchen reichendem Kalkstab; nur wenigen Formen bleibt ein kurzer (bei Loxechinus mit Längs-, bei Anthocidaris und Strongylocentrotus mit Längs- und Ringmuskulatur zum Ein- und Ausstülpen versehener) Hals frei. Außen (bei Cidariden innen und bis auf eine wimpernde obere Stelle, den „Mund", von Kalkgewebe umschlossen) liegen den Kiefern starke Giftdrüsen auf, deren doppelter Ausführungsgang sich vereinigt, durch eine äußere Furche im Kalkgewebe läuft und außen nahe bei dem Terminalzahn mündet. Jede der mehrzelligen großen Drüsen (mit Muskelhülle) war ursprünglich doppelt und ist es noch immer bei Toxocidaris, Parasalenia, Notechinus magellanicus, Selenechinus, Genocidaris maculata und überhaupt vielen Temnopleuridae. Bei Sphaerechinus granularis, Toxopneustes- und Echinometraarten kommen in der Mitte des Stieles nochmals 3 große Drüsen mit Oeffnung vor. Das Köpfchen kann wegfallen und diese Drüsen allein übrig bleiben (Sphaerechinus, Gymnechinus, Toxopneustes). Die Kieferfurche, die bei Parechinus an ihren Seiten zahlreiche Zähne aufweist, kann sich schließen, wobei die Seitenzähne sich vermindern (bei Echinometriden nur noch einer jederseits) und schließlich den Terminalzahn allein übrig lassen (Toxopneustes). Die Pedicellariae globiferae stehen meist dorsal, auf das Buccalfeld rücken nur diejenigen der Cidariden.

Die Giftzangen sind Verteidigungswaffen: auf den chemischen Reiz zersetzender Substanzen, die von Füßen wie vom Darm eines Seesternes ausgehen, strecken und öffnen sich die Giftzangen zwischen den abgewendeten Stacheln dem Gegner zu, in dessen Weichteile sie bei Berührung einbeißen und ihr Gift (zumal beim Ziehen) entleeren. Ein angreifender Seestern zieht sich dann zurück, reißt die Pedicellarien ab und kann so nach mehreren erneuten Angriffen den Gegner wehrlos machen.

2. Die Pedicellariae tridentatae (tridactylae) oder „Klappzangen" besitzen 3 einfache, nach außen etwas konvex gekrümmte Kiefer, über dem Kalkstab des Stieles folgt ein elastisches Band, das das Köpfchen wieder hebt, wenn es durch die Muskeln der weichen Stielpartie geneigt worden ist. Die Klappzangen öffnen sich auf kleinste mechanische Reize und schließen sich auf etwas stärkere mechanische und chemische Reize hin. Sie haben kleine Larven parasitischer Tiere, die sich auf dem Seeigel ansetzen wollen, zu vernichten. Die Klappzangen können auf dem ganzen Körper verteilt sein.

3. Die ophicephalen Pedizellarien oder „Beißzangen" sind kleiner (2 bis 5 mm), haben gedrungene Kiefer mit einem Kalkbogen an der Unterseite und scharfen Zahnzacken an den Innenrändern. Bei Araeosoma besitzen die Pedizellarien Giftdrüsen, zwischen den Kiefern, unter denen bei Hapalosoma die rudimentären

Kiefer verschwinden. Phormosoma und Pourtalesia zeigen solche Giftbeißzangen mit 4 Zangen. Die Beißzangen ergreifen kleine Krebse und dergleichen, um sie den Füßchen zu überliefern. Sie stehen ungleich anderen P. besonders reich auf der Peristommembran, doch können sie auch sonst allenthalben vorkommen.

4. Die Pedicellariae trifoliatae oder „Putzzangen" sind noch erheblich kleinere Formen mit lose ein gerenkten blattförmigen Kiefern ohne größere Bezahnung. Sie können an allen Stellen der Körperoberfläche stehen. Diese Formen geraten durch Lichtreize, fallenden Staub usw. in Tätigkeit, dienen zum Ergreifen von Kot und Detritusbestandteilen, die von 2 Klappen erfaßt und von der 3. zu feinstem Mulm zerschlagen werden.

Die Zurückführung der Pedizellarien auf Stacheln bezw. Stachelgruppen ist nicht bewiesen, auch die Homologie mit den 2kieferigen Pedizellarien der Seesterne ist sehr fraglich.

Nach den bahnbrechenden Darlegungen von Mortensen und den Erfahrungen von de Meijere, Döderlein sind die Pedizellarien von großem systematischem Wert. Diejenigen der Cidariden zeigen alle eine auffallende Verengerung am oberen Stielende, während diejenigen aller anderen Gruppen oben meist etwas verdickt sind (diadematidenförmig). Die Tridentaten können bei einer Art in verschiedenen Formen auftreten. Manchmal fehlen Individuen von anderer Herkunft Pedicellarien, die sich normalerweise bei der Art vorfinden (Cidarites affinis, baculosa, bispinosa, Stomopneustes variolaris, Brissopsis luzonica usw.).

Was nun die Verbreitung der Pedizellarien angeht, so finden sich bei den Cidaridae nur tridentate und globifere (mit eingeschlossener Giftdrüse), bei den Arbaciidae und Saleniidae nur tridentate und ophicephale, bei den Micropygidae und Clypeastroidea außer diesen noch triphylle Pedizellarien, bei allen anderen Familien der Regularia und innerhalb der Spatangoidea alle 4 Hauptformen nebeneinander, ja bei den Spatangoidea die tridentaten in der Regel in mehreren scharf getrennten Formen nebeneinander (Döderlein 1906 S. 80).

Nervensystem. Von den 3 Nervensystemen der Echinodermen ist nur das ambulakrale oder ektoneurale wohlentwickelt. Es ist in die Tiefe gesunken und bildet den verdickten Boden des Epineuralkanals, der sich wahrscheinlich als geschlossene Nahrungsfurche betrachten läßt. Sowohl der enge (nur bei Spatangiden weitere)

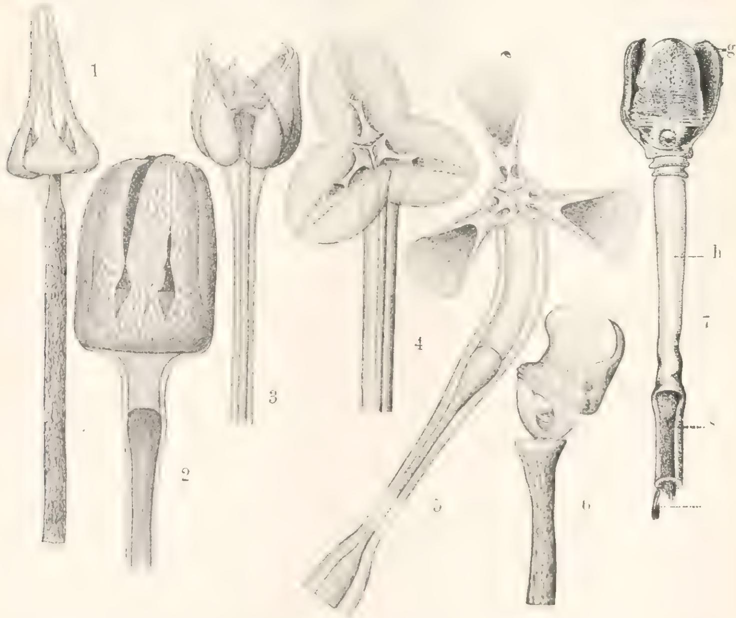


Fig. 31. Typen von Seeigelpedizellarien. 1 und 2 tridentate (tridactyle), 3 und 4 globifere, 5 trifoliate, 6 und 7 ophicephale. 1 Cidaris affinis Phil. 2 Brissopsis atlantica (?) Mort., mit 8 Zangen. 3 Notechinus magellanicus (Phil.), mit 3 mal 2 Drüsen. 4 Parechinus miliaris (Müll.). 5 Sperosoma grimaldii Koehl. 6 Plexechinus nordenskjöldi Mort. 7 Echinus esculentus (L.), z Zangen, h Halsteil, s Stiel. Figur 7 nach Kükenthal, alle übrigen nach Mortensen.

direkt am Mundeingang innerhalb der 5 Zähne gelegene Nervenring als auch die 5 Radiärnerven werden von solchen Kanälen begleitet. Der Ringnerv entsendet in den Oesophagus eine Anzahl (5 Paare) Nervenstränge, die sich als epitheliale Nervenlage bis zum Enddarm hin verfolgen lassen. Jeder Radiärnerv läuft unter den Aurikeln her an der Innenseite der Schale entlang bis zu den Ocellarplatten, durch deren Oeffnung er, dicht an das blinde Ende des Wassergefäßkanals gedrängt, hindurch tritt und gemeinsam mit diesem den (außer bei Echinocyamus) äußerst kurzen, papillenförmigen Endtentakel bildet, der durch seine Pigmentierung ein Auge vortäuscht und den Namen Ocellarplatten veranlaßt hat. Das Ende des Radiärkanals wird ganz von einer Nervenlage überkleidet, die dann allseitig in den subepithelialen Hautnervenplexus übergeht. Der Epineuralkanal endigt kurz vorher. Zu jedem Füßchen entsendet der Radiärnerv einen Füßchennerv, der an der radialen Seite desselben aufsteigt und unter der Saugscheibe einen kleinen Nervenring bildet. Gemeinsam mit dem Füßchennerv durchsetzt ein Hautnervenast die Schale, um sich an der Berührungsstelle mit der Epidermis radialwärts zu wenden und in den großen Hautnervenplexus der Füßchen und Pedizellarien einzutreten. Füßchennerv und Hautnervenast sind auf ihrem Lauf durch die Schale von einem dünnsten, fast bis zum Hautepithel reichenden Fortsatz des Epineuralkanals getrennt, an dessen Epithel diese Nerven gebunden sind. — Nervenring und Radiärnerven weisen an ihrer Außenseite eine große Anzahl Kerne auf. Die Nervenfasern (mit Ganglienzellen) verlaufen zwischen senkrecht zur Schale stehenden Stützfasern. Der Radiärnerv ist in der Höhe des Schalenäquators am dicksten.

Das tieferliegende Nervensystem, das im wesentlichen motorisch ist, fehlt in den beschalten, nicht muskulösen Partien der Körperwand, wurde aber von Cuénot bei allen mit Kiefern versehenen Echinoiden an der Ursprungsstelle der Radiärnerven als 5 T-förmige Nervenmassen, die vom ambulakralen Nervensystem durch eine feine Lamelle getrennt sind und ihr von innen anliegen, angetroffen. Sie erstrecken sich eine kurze Strecke weit auf die Radiärnerven und nach jeder Seite auf den Ringnerv, doch ohne gegenseitig in Zusammenhang zu kommen. Von diesen Nervenmassen gehen 5 Paare von Nerven auf die Seite der Kieferpyramiden, um den Kauapparat zu innervieren.

Das apikale Nervensystem wird möglicherweise repräsentiert durch ein Fünfeck nervöser ganglionärer Stränge, dessen Ecken die Genitalöffnungen bezeichnen, und dessen Kanten an der Peripherie des genitalen Sinus liegen und vielleicht mit den Enden der Radiärnerven in Verbindung stehen. Es wurde bei Echinus acutus, Strongylocentrotus lividus, Arbacia pustulosa und Echinodiscus biforis (Clypeastride), nicht aber bei Dorocidaris papillata und Echinocyamus pusillus gefunden.

Außer den Sinnesendigungen in der Haut, den Stacheln, Sphaeridien, den Pedizellarien und Füßchen und dem Endtentakel sind keine eigentlichen Sinnesorgane bekannt. Bei Diadema setosum und Astropyga stehen eigenartige Organe auf der ganzen Körperoberfläche, die als leichte Wölbung vorragen und wie eine Bienenwabe aus einzelnen 6eckigen Kammern bestehen, die wahrscheinlich große Drüsen darstellen und von einem Epithel überzogen werden. Sie wurden früher als Augen, neuerdings dagegen als Leuchtorgane gedeutet.

Die ganze Körperoberfläche ist trotz des Mangels von Augen lichtempfindlich. Die Tiere suchen die weniger hellen Partien auf, die Stacheln (besonders die dorsalen, kleinen, violetten, von Centrostephanus longispinosus) geraten bei starkem Lichtreiz in Rotation; Centrostephanus longispinosus und mehrere tropische Arten reagieren auf Schatten dadurch, daß die Stacheln nach der beschatteten Stelle hin konvergieren, was ungleich der Reaktion auf starkes Licht sogleich bei Zerstörung des Zentralnervensystems aufhört, weil es nach v. Uexküll auf einem durch die Lichtwirkung sozusagen angesammelten und bei Beschattung rückwirkenden Tonus beruht.

System der Sinus oder Perihaemalkanäle. Am aboralen Körperende findet sich unter den Genitalplatten ein 5eckiger bis ringförmiger, der Körperwand anliegender aboraler Sinus, der von seinen interradialen Ecken kleine Fortsätze zu den Geschlechtsorganen selbst hinsendet. Der Axialsinus bildet einen an der Oralseite blindgeschlossenen Sack des Axialkomplexes, der unweit der Madreporenplatte in den Steinkanal einmündet. Er hat niedrigeres Epithel als der letztere.

5 radiäre Sinus ziehen in typischer Lage unter dem ambulakralen Nervensystem von der Basis des Endtentakels bis in die Gegend der Peristommembran, wo sie ganz dünn werden und verschwinden. Auf der anderen, inneren Seite des radiären Sinus folgt das Wassergefäß, und in der Trennungswand von beiden verläuft die radiäre Blutlakune.

Der orale Sinus, aus dem nach Mac Bride die radialen Sinus bei der Larve hervorwachsen sollen, steht beim ausgebildeten Tier mit ihnen nicht mehr in Zusammenhang. Es ist überhaupt nur bei den Atelostomen normal ausgebildet. Bei den Seeigeln mit Kieferapparat scheint er durch den großen perignathischen Sinus repräsentiert zu werden. Er entsteht als ein Komplex von 5 interradialen Auswüchsen des linken Cöloms unter der Munddecke, die später an der Oberseite der Laterne in Verbindung treten und eine einzige Membran gegen das Cölom bilden. An diesem Oberende finden sich 5 interradiale Aussackungen (die „Zahnblasen") für die vorstehenden, eingerollten, weichen Innenenden der Zähne und 5 radiale, unter den Gabeln der Gabelstücke in die Leibeshöhle vorspringende, zuweilen verzweigte (Cidariden), auch eigener Kontraktion fähige (bei Asthenosoma urens besonders große, bei Echinus esculentus aber fehlende) „Gabel- oder Stewartsche Blasen". An seiner Oralseite treibt jeder der 5 Hauptsäcke 2 interradiale Mundkiemenbäume nach außen vor. Durch die Muskulatur der Gabelstücke und der Peristommembran kann die Flüssigkeit des Kiefersinus zur Atmung abwechselnd in die (muskellosen) Kiemen und jene Blasen gepreßt werden. Das Sinusepithel ist flach und bewimpert, außen von Cölomepithel bezw. in den Kiemen vom Ektodermepithel umgeben. In der Bindegewebslage von Kiemen und Kauapparatsinus können Kalkkörper vor-

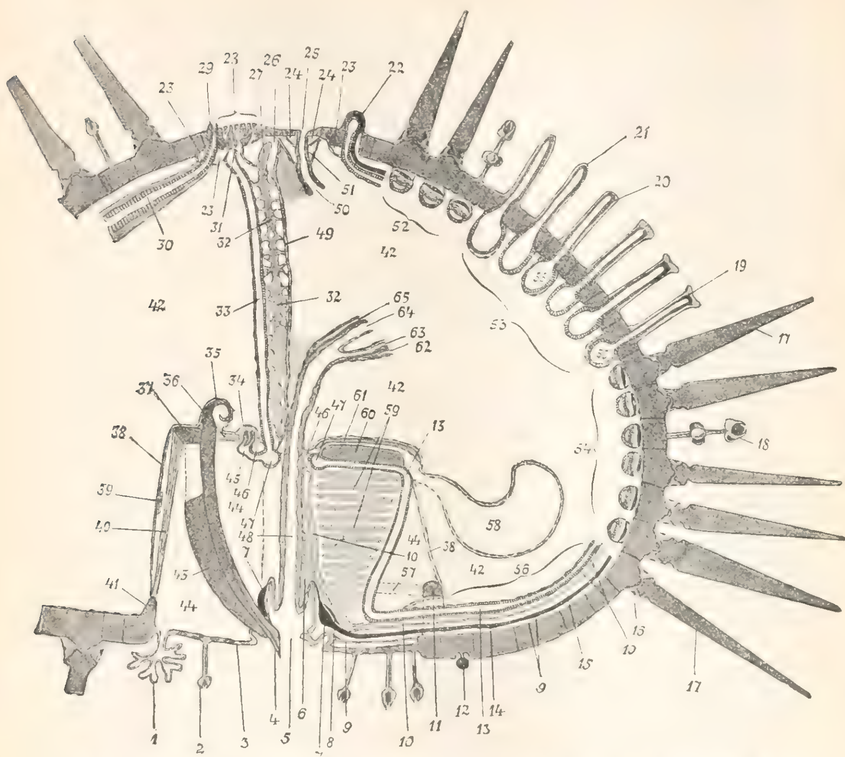


Fig. 32. Organisation eines regulären Seeigels. Schema. Rechts radial, links interradial durch die Hauptachse geschnitten. 1 Kieme (etwas seitlich vom 1), 2 tridentate Pedicellarie, 3 Peristommembran, 4 Zahn, 5 Mund, 6 Bindegewebspolster, 7 Epineuraler oraler Nervenring, 8 hyponeurale Nervenmassen, 9 radiarer Epineuralkanal, 10 radiare Blutlakune, 11 Aurikel, 12 Sphaeridie, 13 Radialkanal, 14 epineuraler Radiarnerv, 15 radiärer Sinus, 16 Nervenring der Stachelbasis, 17 Stachel, 18 globitere Pedicellarie, 19 Ambulakralfüßchen, 20 und 21 Ambulakraltentakel, 22 Terminalfühler, 23 genitaler Sinus, 24 perianaler Cölomraum, 25 After, 26 Sinus mit Axialorganfortsatz (27), 28 Madreporit, 29 Genitalpapille mit Oeffnung, 30 Genitalgang, 31 Ampulle, 32 Axialorgan, 33 Steinkanal, 34 Lakunen in den spongiösen Bläschen, 35 Zahnwurzel in der Zahnblase der Laternenmembran, 36 Muskel zwischen den Gabelstücken, 37 Arcus, 38 Laternenmembran, 39 muskulöses Band vom Gabelstück, 40 Schließmuskel, vom Arcus ausgehend, 41 Interambulacralteil des perignathischen Gürtels, 42 Cölom, 43 Kiefer, 44 Sinus der Laterne, 45 Wassergefäßteile der spongiösen („Polischen“) Bläschen, 46 orale Ringlakune, 47 Wassergefäßring, 48 Oesophagus, 49 Axialsinus, 50 Enddarm, 51 Perirektalsinus, 52 und 54 etwas adradiale Schnitteile mit den Kanälen zu den Füßchen, 53 noch mehr adradial geschnitten: Füßchenampullen, 56 genau radiärer Schnitteil, 57 Kieferöffnungsmuskel, 58 Stewartsche Blase, 59 Schließmuskel zwischen den Kieferpyramiden (und Arcus), 60 Rotula, Zwischenkiefer, 61 Gabelstück, 62 und 65 Darmlakunen, 63 Nebendarm, 64 Hauptdarm. Aus Lang.

kommen. Aeußere Kiemen der Mundhaut fehlen den Clypeastriden und Cidariformia.

Wassergefäßsystem. Das Wassergefäßsystem folgt nach innen von den Sinus; das gilt in typischer Weise von den Radiärkanälen, deren Trennungswand gegen die radiären Sinus die radiäre Blutlakune aufweist. Den Wassergefäßring finden wir bei allen Kieferigeln wegen der Ausbildung des oralen Sinus zum Kauapparatsinus auf dem oberen Ende des Kau-

apparates. Ein Blutgefäßring begleitet ihn. Der Wassergefäßring bildet interradial 5 schwammige Organe (die bei Echinocyamus fehlen, bei Echinodiscus zu mehreren in jedem I. auftreten und bei Dorocidaris zu einem in den J. vorspringenden Ring ausgezogen sind, Cuénot), in denen das Lumen fingerförmige Fortsätze treibt, die in ein Lakunennetzwerk hineinragen, das vom Blutgefäßring in der verdickten Wand gebildet wird. Diese spongiösen Bläschen sind als „Polische Blasen" benannt worden, lassen sich aber mit den so bezeichneten Organen anderer Echinodermen kaum vergleichen. Die radialen Wassergefäße laufen zunächst unter den Rotulae her zur Peripherie der oberen Laternenfläche, senken sich dann gegen die Peristommembran, geben dort einen sich bald teilenden Kanal für die 2 Peristomfüßchen ab, treten unter dem Aurikelbogen durch und verlaufen bis zu den Ocellarplatten, um in dem Endtentakel zu endigen. Das radiale Blutgefäß trennt sich im Anfang vom Wassergefäß, verläuft nahe am Oesophagus zur Mundfläche hinab, um sich erst dann an seinem Ort zwischen Sinus und Wassergefäß einzuschieben.

Vom Radiärkanal gehen abwechselnd nach beiden Seiten die Füßchenkanäle, die sich mit einer Klappe in die in oroapikaler Richtung abgeplatteten Füßchenampullen öffnen, die wie der ganze innere Teil des Wassergefäßsystems mit Ringfasern und außerdem noch mit besonderen, das Lumen durchsetzenden Muskelsträngen, den „Trabeculae", versehen sind. Bei Holasterinen (Urechinus, Cystechinus, Calymne), bei Neolampas und Palaeotropus (Spatangiden) und den außerpetalen Füßchen der Clypeastriden (auf Radial- und Interradialplatten!) und Spatangiden sowie bei Jugendformen verbindet sich die Ampulle durch einen Kanal mit dem Füßchen; im allgemeinen aber sind immer zwei innen wimpernde „Füßchenwurzeln" vorhanden, durch deren Trennung die Flüssigkeit von der Ampulle zum Füßchen in konstantem Strom fließen und die Füßchenatmung steigern kann. Das Füßchen besitzt nach innen von einer elastischen Schicht (mit Ringmuskelfasern?, Hamann) eine Längsmuskelfaserlage, außen ein Epithel mit zahlreichen Sinneszellen und Wimpern, die nur auf der Saugscheibe des Füßchens fehlen. Unter dieser befindet sich ein kleiner Kalkring und kleinere Kalkkörper und darunter ein kleiner Nervenring, der durch den Füßchennerv mit dem Radiärnerv in Verbindung steht. Die Kalkkörper der Füßchenwand sind systematisch verwertbar.

Zweilappige Endscheiben mit Sinnesborsten besitzen die oft ampullenlosen 10 (oder mehr: Cidariden und Echinothuriden) Mundfüßchen der Buccalzone. Eine einfache mit Sinneshaaren versehene Spitze ohne Kalkrosette zeigen die zuweilen vorhandenen (z. B. bei Centrostephanus) Tastfüßchen des Rückens. Hier kann man die kalkkörperlosen manchmal blattförmig gelappten Atempapillen der Petalodien anschließen. Bei Spatangiden kommen außer diesen Kiemenfüßchen der Petalodien noch Füßchen mit besonders großer Kalkrosette im mittleren R. der Kriechseite und konische Tastfüßchen in den übrigen Radien sowie besondere Sinnesfüßchen in der Gegend um Mund und After vor.

Steinkanal und Axialkomplex. Der Steinkanal geht vom Wassergefäßring zur Madreporenplatte, unter der er zu einem aus dem l. v. Enterocöl hervorgehenden Infundibulum wird, aus dem ein (Larven und Echinocyamus pusillus) oder zahlreiche verzweigte, zuweilen über mehrere Apikalplatten ausgedehnte Porenkanäle nach außen münden. Mit dem Infundibulum hängt der axiale Sinus zusammen (= l. v. Enterocöl oder Derivat des l. h. Enterocöls?), der den Steinkanal an seiner axialen Seite nicht ganz bis zur Laterne hin begleitet und dort geschlossen endigt. Der bei Echinus weiche, bei Cidariden kalkige, mit hohem Wimperepithel versehene Steinkanal und der Axialsinus werden von einer lakunären Masse, dem Axialorgan (das hier einen vom l. h. Enterocöl entspringenden Genitalstolo darstellen soll) umgeben und gemeinsam mit ihm von Cölomepithel umschlossen. Die Axiallakune mündet oben in die Genitallakune und unten in den Blutgefäßring. Neben dem Infundibulum liegt noch ein kleiner geschlossener Hohlraum, der einen kurzen bindegewebigen Fortsatz des Axialorgans enthält, er stellt einen Rest des rechten Hydrocöls (des kontraktilen „Dorsalsackes") dar.

Darm, Mesenterium, Leibeshöhle. Der Darm steigt als Pharynx durch die Laternenmitte auf, geht als Oesophagus im l. p. R. oder l. p. I. horizontal zur Schalenwand und verläuft dann quer um die Schale, wobei er in den Interradien weit nach der Mundseite zu ausweicht, um den Geschlechtsorganen Platz zu machen. Dieser von der Oralseite gesehen in Richtung des Uhrzeigers gedrehte Darmteil wird auch Magen genannt, er geht im m. p. I. in den umkehrenden Dünndarm über, der apikalwärts vom Magen dessen Ausbuchtungen wiederholt, um endlich im l. p. I. die Schale zu verlassen und senkrecht zu dem im r. a. R. gelegenen After aufzusteigen (Fig. 1, 4).

Bei den Spatangiden geht der Darm erst in der Lovénschen Symmetrieebene (l. p. R.) nach vorn, dann (ventral gesehen) im Sinne des Uhrzeigers bis zum m. p. I., wo er umkehrt und beinahe eine Ganzwindung linksherum beschreibt, um in der Symmetrieebene in der Nähe des Mundes angekommen (r. a. I.) in dieser nach dem nach hinten verschobenen After zu laufen. Die großen Ausbuchtungen fehlen in dem Darmverlauf; am Ende des ersten Halbkreises, den der rechtsdrehende Anfangsdarm beschreibt, findet sich ein großer Blindsack (Fig. 1, 5).

Der Darm besitzt ein äußeres und ein inneres Mesenterium.

Bei den Kieferigeln bildet das innere Mesenterium nur eine kleine frei endigende Falte, während das gegenüberliegende, äußere an der Plattenseite meist in einzelne Fäden aufgelöste Mesenterium den Darm in seinen Windungen an die Schale befestigt, an Oesophagus und Enddarm aber klein wird und die Schale nicht erreicht. Das innere Mesenterium wird an diesen Stellen etwas breiter. Das in der Mitte niedrige Steinkanalmesenterium setzt sich durch Verbreiterungen oben bezw. unten mit Enddarm, Schale und Oesophagus in Verbindung.

Dicht hinter den 5 Zähnen finden sich am Mund 5 interradiale Lippen, bei Spatangiden eine große interradiale Unterlippe (r. a. I.). Der (bei Atelostomen rudimentäre) Pharynx legt sich in der Laterne zuweilen in radial vorspringende Längsfalten, von denen muskulös-bindegewebige

Bänder zu den Kieferenden gehen. Er besitzt Ringmuskulatur, und sein Innenepithel ist drüsenreich. Der Oesophagus hat außerdem außen Längsmuskulatur, und einen Ueberzug von Leibeshöhlenepithel. Der Magen zeigt hohe an Granulationen reiche Innenzellen und große Lakunen außen in seiner Bindegewebsschicht, alles Merkmale, die im Dünndarm weniger ausgesprochen sind. Der starkwandige Enddarm hat eine besonders starke Ringmuskularis. Bei Spatangiden gehen die Darmteile ganz allmählich ineinander über.

Nebendarm. Der Magen besitzt bei Dorocidaris eine tiefe endostylartige Furche mit besonderen Zellen. Bei den meisten Echinoiden trennt sich diese Furche der Innenseite von dem Darmlumen bis auf eine vordere Mündung am Oesophagus und eine hintere am Dünndarmbeginn als „Nebendarm" (Sipho) völlig ab. Die Nebendarmzellen entbehren der Granulationen. Bei Spatangiden ist die vordere Oeffnung mit Semilunarklappe versehen, der Nebendarm trennt sich in seinem vorderen Teile vom Hauptdarm, wo er aber durch einen feinen akzessorischen Nebendarm (Brissus, Brissopsis, Schizaster) ersetzt werden kann. Bei Echinocardium findet sich auch ein rektaler Nebendarm. Der Nebendarm fehlt den Clypeastriden.

Darmgefäße. Etwa gegenüber von der Axiallakune entspringt vom Blutgefäßring eine Darmlakune, die an dessen innerer Seite entlang zieht und am Magen beträchtliche Dicke erreicht. Von ihr kann sich (Echinus esculentus) in der Magenregion eine parallele Kollaterallakune abgliedern, die nur durch einige Querverbindungen mit der Innenlakune in Zusammenhang steht. Gegenüber der inneren Darmlakune verläuft an der Schalenseite das schwächere äußere Darmgefäß. Die zahlreichen Lakunen der Darmwand stehen mit den erwähnten Gefäßen, zumal dem inneren, in direkter Verbindung. Bei den Spatangiden finden wir dieselben beiden Randlakunen des Darmes, von denen sich auch hier die innere in den Blutgefäßring öffnet. Sie kann sich mit dem Sipho vom Darm selbst abheben. Innere und äußere Lakune versorgen auch den Darmblindsack. Sie lassen sich mit der mesenterialen und antimesenterialen Darmlakune der Holothurien vergleichen.

Die Leibeshöhle ist sehr geräumig, ihr Epithel hebt sich nur an den Stellen, an denen Sinus verlaufen, von der Körperwand ab. Beträchtlich ist dieses Zurückweichen nur am Kauapparat, der nur an seiner Innenseite von Cölomepithel überkleidet wird, während der große Kiefersinus ein Vordringen des eigentlichen Cölomepithels zur Buccalmembran usw. hindert. Andere im Inneren der Schale vorspringende Organe (Axial- und Genitalorgane) werden natürlich von Leibeshöhlenepithel überkleidet. Dieses Epithel ist häufig bewimpert (z. B. am Darm). Die Grenze vom linken und rechten Cölomsack hat man sich wahrscheinlich zwischen Basalia und Terminalia zu denken.

In der eiweißhaltigen Flüssigkeit der Leibeshöhle und Lakunen findet man einfache amöboide, oft syncytial zusammentretende freie Zellen sowie andere, die mit Reservestoffen, Exkreten (häufig im Axialorgan) oder Pigment reich beladen sind. Auch sind häufig Geißelzellen anzutreffen. Ganz ähnlich verhält sich die Flüssigkeit des Wassergefäßsystems; diejenige der Lakunen scheint eiweißreicher.

Geschlechtsorgane. Die primäre Gonade geht vom Steinkanalmesenterium aus, vielleicht ist sie ein Teil des Axialorgans (Genitalstolo, Mac Bride), vielleicht eine davon unabhängige Bildung. Sie umwächst dann die Apikalregion in einem im r. p. R. offen bleibenden Kreis, von dem in die Interradien die eigentlichen Gonaden ausgehen. Die dazwischen liegenden Partien des Genitalstranges werden zu einer Lakune (also nicht die ursprüngliche aborale Lakune), die sich mit einem gleichfalls sekundären Ringsinus umgibt. Die 5 Genitaldrüsen sind sack- bis traubenförmig, sie sind an einem Mesenterium aufgehängt und entwickeln an ihrer mesenterialen Seite einen wimpernden Ausführungsgang, der durch die Oeffnungen der Genitalplatten nach außen durchbricht und sich manchmal (Dorocidaris, Echinus acutus, Echinocyamus, Echinocardium) nach außen als Genitalpapille fortsetzt. (Ueber die Oeffnungen siehe oben.) Bei den irregulären Seeigeln verschwindet die Gonade des r. a. I., aus dem sie wohl durch den hierhin wandernden Enddarm und After verdrängt wird. Bei Spatangiden bleiben zuweilen nur 2 Gonaden symmetrisch im r. p. und l. a. I.

Histologisch bestehen die Geschlechtsorgane innen aus dem Keimepithel, einer Ringmuskelschicht, einer lakunenreichen Bindegewebslage und dem wimpernden Cölomepithel.

Die Geschlechter sind getrennt, nur ausnahmsweise findet sich Zwittrigkeit (Spaerechinus granularis). Die Ovarien sind bräunlich, gelblich oder rötlich, die Hoden meist weißlich gefärbt.

Die Eier werden gewöhnlich frei ins Meerwasser abgesetzt, wo sie auch befruchtet werden. Einige wenige Echinoiden zeigen Brutpflege. Bei Eurocidaris nutrix, Rhynchocidaris triplopora, Notocidaris gaussensis, Aporocidaris antarctica entwickeln sich die Jungen in der Umgebung des Mundes, bei Austrocidaris canaliculata auf dem Scheitelfeld, bei Hypsiechinus coronatus in einer ringförmigen Apikalzone, wo sie in jedem Falle von Stacheln beschützt werden. Bei Abatus cavernosus und Amphipneustes koehleri finden sich die Jungen in den in bezug auf die Lovénsche Ebene paarigen, beim ♀ grubig vertieften Petalodien, wo sie von den Randstacheln beschützt werden. Ein besonderer, wahrscheinlich durch Einstülpung entstehender Brutbeutel, der sich am Apikalende öffnet, beherbergt die Jungen bei Anochanis sinensis.

b) Systematik der Echinoiden. Die alte Einteilung in Palaeechinoidea (mit 1 oder mehr als 2 iamb. Reihen in jedem I. und 2 oder mehr amb. Reihen in jedem R.) und Euechinoidea (mit je 2 amb. und iamb. Reihen pro Antimer) erweist sich als unnatürlich. Die Unterscheidung der Regularia und Irregularia läßt die Sonderstellung der kiemenlosen mit ambulakralem und interambulakralem Peristomskelett versehenen Cidariden gegenüber den „ektobranchiaten" regulären Seeigeln nicht genug hervortreten, während die engen durch das Verhalten der Pedizellarien bestätigten Beziehungen dieser letzteren zu den irregulären Seeigeln nicht genügend gewürdigt werden. Nach den neuen Arbeiten von Mortensen, Döderlein, Haw-

kins und von Gregory ergibt sich ungefähr folgende Gruppierung der rezenten Formen:

Klasse: Echinoidea, Seeigel.

I. Unterklasse. Cidariformia (Regularia endobranchiata). Peristomfeld mit zahlreichen ambulakralen und interambulakralen Platten. Ohne äußere Kiemen (bezw. Coronaeinschnitte für dieselben). Pedicellarienstiele oben verschmälert. Ophicephale (und trifoliate) Pedicellarien fehlen. Köpfchen der globiferen ohne Hülle, die Giftdrüsen von Kalk eingeschlossen. Mund und After zentral. (Ohne Sphäridien.)

1. Ordnung. Cidaroidea. Normales Apikalsystem, 2 Reihen meist primärer Amb. in den Radien (selten Halbplatten). Interradialplatten mit einem großen Höcker und kräftigem langem Stachel. Mit Kauapparat.

1. Familie. Cidaridae. Schale fest, mit je 5 Doppelreihen von breiten Iamb. und schmalen primären Amb., die sich alle in loserem Verband auf die Peristommembran fortsetzen. Porenpaare uniserial. Perignathischer Gürtel nur mit interradialen Apophysen, meist nicht geschlossen. Große (verzweigte) Stewartsche Organe („innere Kiemen"). Ueber Pedizellarien siehe oben Cidariformia. Besonders große kräftige Stacheln in 2 Reihen in den I. Devon bis Jetztzeit. Cidaris und zahlreiche lebende Gattungen.

II. Unterklasse. Diadematiformia (Döderlein). Pedicellarienstiele oben nie verschmälert, meist verdickt. Ophicephale (und meist triphylle) Pedizellarien vorhanden. Globifere Pedizellarien mit Umhüllung von Weichteilen. Peristom, wenn ausgebildet, nicht mit iAmb., Giftdrüsen nicht eingeschlossen.

1. Ordnung. Regularia (ectobranchiata) Endozyklisch. Mund und After an den beiden Körperpolen. Mit äußeren Kiemen, die Einschnitte im Peristomrand zu hinterlassen pflegen. Amb. gewöhnlich zusammengesetzt.

1. Unterordnung. Diadematina. Zähne ungekielt. Hauptstachelhöcker durchbohrt. Ophicephale Pedizellarien ohne oder mit sehr kurzem Hals. Stets triphylle Pedizellarien, wogegen die globiferen oft fehlen. Amb. im einfachsten Falle alle Primärplatten. Meist aber diademoid oder noch mehr zusammengesetzt.

1. Tribus. Streptosomata. Mehr als 10 Amb. auf dem Peristom. Körperwand mehr oder weniger biegsam, Amb. und Iamb. in apikaloraler Richtung bezw. umgekehrt dachziegelig übergreifend. Stewartsche Blasen zuweilen groß. Wie bei Diadematinen sind die Stacheln meist hohl, zuweilen an ihrem Ende trichterartig verdickt oder mit apikaler Hautverdickung umgeben (Giftstacheln). Es kann sich kräftige Hautmuskulatur entwickeln, bei Asthenosoma riesige Radiärmuskeln.

Familie. Echinothuridae. Zahlreiche lebende Gattungen und die ausgestorbenen Echinothuria und Pelanechinus.

2. Tribus. Stereosomata. Mit nur 10 Amb. auf dem Peristom. Corona fest.

1. Familie. Orthopsidae. Aspidodiadematidae. Porenpaare einreihig. Amb. alle Primärplatten. Basalia und Terminalia in einem Kranz. Im Periprokt 5 große Analplatten. Mittel-Lias bis rezent. Orthopsis usw. fossil. Aspidodiadema, Tiefseeform mit amb. durchbohrten Primärhöckern. Dermatodiadema ohne ambulakrale Primärhöcker.

2. Familie. Diadematidae. Auf dem Ambitus zusammengesetzte Platten: aus 3 primären (diademoid), manchmal komplizierter mit Halbplatten. Lias bis rezent. Zahlreiche Genera. Diadema, Centrostephanus, Echinothrix usw.

3. Familie. Micropygidae, Diplopodiidae. Porenpaare wenigstens in Peristomnähe biserial. Amb. zusammengesetzt. Primäre Stacheln des Ambitus keulenförmig. Füßchen der Außenreihe groß mit auffallender, durch radiäre Kalkkörper gestützter Scheibe, im Stiel mit quer liegenden Kalkankern. Micropyga. Hierhin vielleicht eine Reihe von fossilen Gattungen, Diplopodia usw.

4. Familie. Pedinidae. Mit meist triserialen Porenpaaren und zusammengesetzten Platten. Stacheln ganzrandig (?). Pedizellarien aller 4 Sorten. Die globiferen ohne Terminalzahn mit Giftkanal. Pedina usw. Hierhin vielleicht auch Orthopsis usw.

2. Unterordnung. Saleniina. Zähne mit Carina (gekielt), Stachelhöcker nicht durchbohrt. Eine einzige große Platte des Periprokts (kein „Centrodorsale") wird fest in das große Apikalsystem inkorporiert. Ambulacra eng mit primären cidaroiden Amb. Ophicephale Pedizellarien ohne Hals; globifere unbekannt, tridentate und triphylle nicht zu unterscheiden. Große cicaridenartige lange Stacheln.

Familie. Saleniidae. Salenia usw. Hierhin vielleicht Acrosalenia mit mehreren „Suranalplatten". Amb. in Peristomnähe zusammengesetzt mit Halbplatten.

3. Unterordnung. Arbaciina. Zähne gekielt. Hauptstachelhöcker ungelocht. Amb. außer bei Tiarechinidae zusammengesetzt. An den Suturen oft Höcker und Löcher, die ineinander passen.

1. Familie. Arbaciidae. Großes Apikalsystem mit nur 4 bis 5 dreieckigen Analplatten. Amb. arbacioid, nur in Nähe der (2-porigen, immer?) Terminalia können Primärplatten bleiben. Ophicephale Pedizellarien ohne Hals. Tridentate und triphylle nicht zu unterscheiden. Globifere unbekannt. Stacheln klein, am Ambitus mt Kappe. Echinocidaris, Podocidaris und Pygmaeocidaris, Arbacia, Coelopleurus usw. mit Stacheln nur an der Oralseite, letztere durch großes Apikalfeld und Anwesenheit unpaarer Iamb. an Tiarechinus erinnernd.

2. Familie. Cyphosomatidae. Stachelwarzen krenuliert, Stacheln klein, ohne Kappe. Periprokt mit mehreren unregelmäßigen Platten. Platten cyphosomoid nur am oralen (oder auch am aboralen) Ende Primärplatten. Meist fossil. Cyphosoma. Rezent ist Glyptocidaris. Globifere und tridentate Pedicellarien bekannt.

4. Unterordnung. Echinina. Zähne gekielt. Hauptstachelhöcker ungelocht. Ophicephale Pedizellarien mit meist langem Halsteil. Gut entwickelte Globiferen und Triphyllen. Die meisten Amb. echinoid, d. h. aus 2 Primärplatten mit eingeschlossener Halbplatte. Zuweilen mehrere eingeschlossene Halbplatten.

1. Familie. Stomopneustidae. Globifere Pedizellarien mit mehreren paarigen Endzähnen (kein unpaarer Endzahn). Stiel kompakt. Ohne Gruben der Coronaplatten, doch mit tiefer Furche längs der Mitte der Interradien. Große solide Stacheln auf der Apikalseite, kleine auf der Oralseite. Ein Primärhöcker auf jeder 4. oder 5. Amb. Buccalmembran mit zahlreichen zarten

durchbrochenen Platten, die Kiemen mit dreistrahligen Spicula. Eine Gattung: Stomopneustes. Küste des Indischen Ozeans, Australien.

2. Familie. Temnopleuridae. Schale mit Skulptur (bei Hypsiechinus und Prionechinus fast fehlend) und mit mehr oder weniger tiefen Löchern und Gruben auf oder zwischen den Coronaplatten, Großplatten aus 3 Primärplatten oder echinoid. Alle 4 Zangenformen vorhanden, aber wenig charakteristisch. Die Globiferen (mit unpaarem Endzahn mit oder ohne Seitenzähne, oft mit [unverschmolzener] doppelter Giftdrüse) können (zuweilen bei einer Gattung: Salmacis) alle möglichen Echininentypen annehmen. Man kann noch trennen:

Temnechininae. Kleine Formen mit Gruben und Furchen auf den Platten, ohne Gruben zwischen den Plattenwinkeln. Hierhin: Hypsiechinus, Lamprechinus, Genocidaris usw.

Temnopleurinae. Mit Winkelgruben, die sich in den Suturen ausbreiten und die Platten unterminieren können. Die Platten mit Knöpfen und Pfannen ineinandergreifend. Hierhin: Temnopleuris, Salmacis usw.

3. Familie. Echinidae. Schale ohne Skulptur. Globifere Pedizellarien mit unpaarigem Endzahn und jederseits mit Seitenzähnen. Stiel aus lockerem Gefüge. Spicula C-förmig. Höcker glatt. Stacheln nicht hohl. Kiemenschlitze klein. Hierhin die rezenten Parechinus, Loxechinus, Protocentrotus, Paracentrotus, Echinus, Sterechinus, Notechinus und fossile.

4. Familie. Echinometridae. Schale ohne Skulptur. Globifere Zangen mit unpaarigem Endzahn und nur einem starken, unpaaren Seitenzahn an einer Seite. Ohne Hals und mit kompaktem Stiel. Spicula C-förmig. Kiemenschlitze klein. Schale manchmal oval. Streckung nicht in der gewöhnlichen Ebene. Hierhin: Pseudechinus, Toxocidaris, Echinometra, Colobocentrotus, Heterocentrotus, Mortensenia, Parasalenia usw. und fossile.

5. Familie. Toxopneustidae. Schale ohne Skulptur. Globifere Zangen mit unpaarigem Endzahn, aber ohne Seitenzähne. Innere Zangenfurche zur Röhre geschlossen. Stachel nicht hohl, Höcker glatt. Regelmäßige Schalenform.

Schizechininae. Globifere Zangen, meist mit Drüsen an dem kompakten Stiel. Spicula klöppelförmig oder als an den Enden nicht angeschwollene Bogen. Tiefe Kiemenschlitze. Hierhin: Psammechinus ,Toxopneustes, Sphaerechinus usw., alle genannten rezent.

Strongylocentrotinae. Globifere Zangen haben einen wohlentwickelten Hals mit Längs- und Ringmuskulatur und einen hohlen Stiel. Ihre Spicula sind C-förmig, an den Enden meist verzweigt. Keine Klöppel und dickendige Bogen. Hierhin die rezenten: Strongylocentrotus und Anthocidaris (letztere mit etwas petaloiden Porenfeldern auf der Oralseite).

Parasaleninae. Globifere Pedizellarien ohne Hals mit kompaktem Stiel, ihre Spicula C-förmig unverzweigt. Füßchenspicula biacerat, mit einem Paar dünner Fortsätze an der hohlen Seite. Kleine Kiemenschlitze. Parasalenia, rezent.

2. Ordnung. Irregularia (Exocyclica). After und Periprokt wandern in den l. a. R., wo sie die Gonade verdrängen. Ihre Stelle wird von Ausdehnungen der Basalia (besonders der Madreporenplatte) eingenommen.

1. Unterordnung. Clypeastroidea. Mehr oder weniger abgeplattet, mit zentralem Mund aber exozyklischem Anus und Periprokt im l. a. R. auf der Oralseite nahe am Ambitusrand. Die 4 Basalia zu großer Madreporen führender Platte verschmolzen. Genitalporen am Außenrand derselben oder in die l. verschoben. Ambulacren petaloid, meist mit breiter Außenporenreihe. Die Poren am Apikalende zwischen den Platten austretend. Die außerpetaloiden azygopor, zuweilen auch über lamb. verbreitet. Die petaloiden Füßchen sind saugscheibenlose lappige Blattkiemen. Auf der Oralseite radiale Actinalfurchen. Nur 5 Iamb. und 10 Amb. am Rand des engen 4lappigen Peristoms. Interradialfelder zuweilen durch breite Petaloide zertrennt. In der Schale ein Endoskelett. Oft Lappen und Lunulabildung am Schalenrand. Sphäridien in fast ganz geschlossenen Höhlen. Keine Peristomkiemen. Kauapparat ohne Gabelstücke, ganz flach: die fast horizontalen Kiefer ruhen auf den offenen interradialen Aurikeln. Darm ohne Nebendarm. Windung ähnlich wie bei Regularia.

1. Familie. Fibulariidae. Petaloide und Endoskelett wenig entwickelt. Interambulacra kontinuierlich. Das lamb. am Peristomrand groß. Nur 5 interradiale Kieferapophysen. Hierhin: Echinocyamus (nur 5 Sphäridien u. 1 Wasserpor), Fibularia rezent. Scutellina tertiär. Kleine Formen.

2. Familie. Laganidae. Interambulacra zusammenhängend, nur 5 Apophysen auf den 5 mittelgroßen Peristom-Iamb. Neben den Kiemenfüßchen zahlreiche Sinnesambulacralpapillen. Petaloide besser entwickelt. Einfache gerade Actinalfurchen. Laganum, rezent.

3. Familie. Scutellidae. Aeußerst flach. Petaloide breit, geschlossen, einige oder alle Interambulacra zerlegend. 5 große Peristom-Iamb. mit 5 Apophysen. Actinalfurchen am Ende gegabelt. Reiches Endoskelett (Säulen). Rotula, Mellita usw. rezent. Scutella, tertiär.

4. Familie. Clypeastridae. 5mal 2 ambulakrale perignathische Apophysen. Interambulacra zerteilt, die Peristom-Iamb. klein. Actinalfurchen gerade. Wohl entwickeltes Endoskelett. Die Petaloide meist geschlossen. Große Formen. Clypeastrinae. Petaloide geschlossen. Plesianthus, Anomalanthus rezent. Clypeaster fossil, tertiär. Arachnoidinae: Petaloide offen. Arachnoides, Alexandria rezent.

3. Unterordnung. Cassiduloidea (Echinoneoidea, Asternata Greg.). Die erwachsenen Tiere ohne Kiefer. Mund nicht zweilippig. Peristom zentral oder subzentral. Schale ohne Sternum und Fasciolen. Floscellen vorhanden oder fehlend. Petaloide, wenn vorhanden, unter sich gleich ausgebildet.

1. Familie. Echinoneidae. Ohne Floscellen und Petaloide. Ambulacra eng und untereinander gleich. Echinoneus rezent. In der Jugend mit an Discoidea erinnerndem Kauapparat und Aurikeln. Zahlreiche fossile Genera.

2. Familie. Nucleolithidae. Ohne Floscellen, subpetaloide Ambulacren. Anochanus rezent. Viele fossile Gattungen.

3. Familie. Cassidulidae. Mit Floscelle, Interradialwülsten am Peristom und geschlossenen

petaloiden Ambulakren. Clypeus, Jura. Cassidulus Kreide, Tertiär. Rynchopygus, rezent. Catopygus, Echinolampas, Palaeolampas, Neolampas rezent. Eolampas tertiär.

4. Unterordnung. Spatangoidea. Mund und Peristom mitsamt dem Zentrum der Radien nach vorn (in den l. p. R.) verschoben. Mund meist mit Unterlippe (und Oberlippe), ohne Kiefer und perignathischen Gürtel. Vorderes Ambulacrum von den übrigen mehr oder weniger petaloiden verschieden. Oft Fasciolen, zuweilen Floscellen. Meist ein Sternum. Ei- bis herzförmig (letztere Form durch Eingedrücktsein des l. p. R.). — Der Mund liegt gleich innen von der Unterlippe, gegenüber das Peristom (zuweilen) mit kleinen Peristomkiemen. Sphäridien einzeln oder gruppenweise in Höhlungen unweit der Buccalfüßchen. 4 Basalia, die Stelle des fehlenden r. a. von der vergrößerten Madreporenplatte (des m. p. I.) eingenommen. Apikalsystem zuweilen zerteilt (siehe S. 421). 5 Terminalia mit Pore. L. a. und r. p. R. meist etwas größer als das hintere symmetrische Paar. Außerhalb der Petaloide Einzelporen. Fiederförmige Füßchen in den Petaloiden. Rosettenförmige mit Kalkskelett und reicher Nervenlage im Radius der Symmetrieebene, konische Tastfüßchen in den anderen Radien. Pinzettenartige Sinnesfüßchen mit keulenförmigen Kalkstäbchen am Ende. — Am Peristomrand 10 Amb. und 5 Iamb., von denen eins die Unterlippe ist, an die sich eine vorderste (meridostern) oder 2 (amphistern) Sternumplatten anschließen. Fasciolen (= Semiten) mit Clavulae in verschiedenen Typen. Endoskelett auf 2 Lamellen seitlich unter der Madreporenplatte beschränkt. Ueber den mit Blindsack und Nebendarm versehenen Darm vgl. S. 429 und 430. Oralsinus klein, nicht als Kiefersinus entwickelt.

ein Trivium gegenüber dem ventralen Bivium bildend. Konvergenz mit Pourtalesiidae, fossil. Collyrites Jura, Kreide.

2. Tribus. Meridosternata. Sternumplatten alternierend, keilförmig zwischeneinander geschoben; nur eine ist in Kontakt mit der Unterlippe.

1. Familie. Ananchytidae. Ursprüngliche Ausgangsgruppe mit Doppelporen. Stereopneustes, Meijeria, rezent. Offaster zur nächsten Familie überleitend.

2. Familie. Urechinidae. Auf die unpaare Peristomplatte folgt in jedem I. eine zweite unpaare Platte. Poren einfach. Urechinus, Pilematechinus, Plexechinus, Cystechinus (?).

3. Familie. Calymnidae. In den vorderen Interambulacra folgen paarige Platten auf die erste unpaare. Einfache Poren. Keine orale Einstülpung. (Marginale Fasciole.) Calymne.

4. Familie. Pourtalesiidae. In den 3 vorderen Interradien folgt auf die erste unpaare Peristom-Iamb.-Platte ein Paar. Poren einfach. Senkrecht gestelltes Peristom. Orale Invagination des vorderen (l. p.) Ambulacrums und damit zusammenhängende Verhältnisse der übrigen Radien. — Gewöhnlich ist der Körper holothurienähnlich, mit rundem Querschnitt, der After supramarginal in tiefer Einsenkung über einem Körperfortsatz, den eine Analfasciole umziehen kann. Die Schale ist sehr dünn, ohne Petaloide, zuweilen mit Floscelle. Das Apikalsystem oft dissoziiert. Vorderer Radius ohne Sphaeridien. Füßchen meist von einer Sorte, nur Sternopatagus besitzt actinale penicillate Füßchen wie die Ananchytidae und Urechinidae. Tiefseeformen. Rez. Sternopatagus (Uebergangsform zu Ananchytidae), Spatagocystis (ohne Fasciole), Apikalsystem zerlegt. Pourtalesia (mit zerlegtem Apikalsystem und Fasciole), Echinosigra usw.

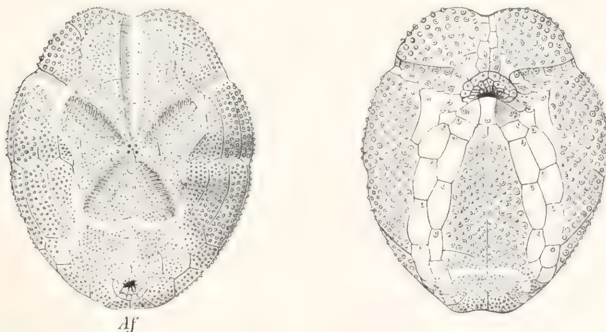


Fig. 33. Brissopsis lyrifera. Links von der Apikalseite mit den petaloiden Ambulakren, der peripetalen Fasciole und dem Afterfeld Af. Rechts die Oralseite mit Peristom, Unterlippe, Amphisternum, Episternum und subanaler Fasciole. Nach Claus-Grobben.

1. Tribus. Protosternata. Kein eigentliches Sternum (rudimentär meridostern).

Familie Collyritidae. Ohne Fasciolen und Floscellen. Apikalsystem zertrennt. R. p. Ambulacrum enger, mit den beiden anderen

3. Tribus. Amphisternata. Zwei Sternumplatten in Kontakt mit der Unterlippe. Die übrigen Merkmale wechseln (Fasciolen, Apikalskelett usw.). Die Familien noch nicht definitiv abgegrenzt. Hierhin: Aeropidae, Palaeopneustidae,

Palaeostomatidae und die komplizierteren: Spatangus, Brissus, Brissopsis usw.

III. Asteroidea. Seesterne. a) Allgemeines. Die Asteroiden sind freibewegliche Echinodermen (Eleutherozoen) mit meist typischen, auf die Nähe der Radien beschränkten Saugfüßchen und Stacheln, oft kommen auch (gewöhnlich zweizinkige) Pedicellarien vor. Der Körper ist abgeplattet und in den Radien in 5 Arme (mit ziemlich geräumigem Cölom) ausgezogen, die sich von dem zentralen Teil, der Scheibe, mehr oder weniger scharf absetzen, oft sogar nur als Ecken derselben erscheinen. Die Oralseite ist dem Boden zugewendet und mit Ambulakren versehen, die sich, wie die offenen Epineuralfurchen (Nahrungsfurchen) in ihrer Mitte nicht auf die obere Körperhälfte fortsetzen (lysaktinisch). Die bei der Larve zuerst angelegten Terminalia finden sich dementsprechend an der Spitze der Arme. Außer den Terminalia werden auf der apikalen Seite frühzeitig ein Centrale, 5 primäre Interradial-(„Basalia“) und etwas später 5 primäre Radialplatten (Radialia) angelegt; sie berühren sich zunächst, werden aber später durch sekundäre Platten (Centroradialia zwischen Zentralplatte und Radialia, sekundäre Radialia von der Terminalplatte aus) auseinander gedrängt und sind beim fertigen Tier meist relativ klein und unauffällig. An der Seite der Arme bilden sich mehr (Phanerozonia) oder weniger (Cryptozonia) große Marginalplatten in zwei Reihen. In der Basis der Nahrungsfurchen treffen sich, einen nach außen offenen Winkel bildend, die beweglichen, außen von Adambulacralia in gleicher Zahl begleiteten Ambulacralia. Sie bilden zusammen am Peristomrand ein Mundskelett, zu dem noch 5 interradiale Oralplatten in den Winkeln der zusammenstoßenden Ambulakren hinzukommen. Gewöhnlich ist ein sekundäres Skelett aus kleinen, meist netzförmig verbundenen Plättchen reich entwickelt. Der Radiärkanal liegt außen von den Ambulacralia, doch finden sich seitlich Löcher zwischen denselben für die innen gelegenen Füßchenampullen. Das dorsale Nervensystem besteht aus 5 in der Mitte zusammenlaufenden Strängen oder Bündeln. In dem leistenartig vorspringenden Epithel der Nahrungsfurchen läuft ein epineuraler, radiärer Nervenstamm, der nur durch eine dünne Lamelle von 2 völlig getrennten hyponeuralen Nervensträngen getrennt wird. Diese Hyponeuralnerven liegen in der Außenwand zweier paralleler radiärer Sinus, die das radiäre Blutgefäß zwischen sich bergen. Die radiären Sinus münden in einen äußeren, oralen Ringsinus (mit hyponeuralem Nervenring), der innen von einem zweiten, vom Axialsinus ausgehenden Ringsinus begleitet wird. Die beiden schließen die Ringlakune ein und werden oral-zentralwärts vom ektoneuralen Nervenring, apikal-peripherwärts vom Wassergefäßring (meist mit Polischen Blasen und immer mit 10 oder 9 Tiedemannschen Körperchen) begleitet. Das bei rezenten Formen dorsale Madreporit wird entweder von einer der primären Interradialplatten (pseudoplacote Formen), oder (ursprünglich) von einem damit verbundenen selbständigen Skelettstück gebildet (Euplacota). Der Steinkanal wird nicht selten vermehrt. Die durch eine Rinne der Terminalia laufenden Endtentakel sind deutlich und mit basalem Auge versehen. Der Mund liegt zentral im Peristom, der (den Porcellanasteriden, Luidiniden und einigen Astropectiniden und Verwandten fehlende) After nicht genau dorsozentral, sondern zwischen dem Centrale und dem l. p. Basale. Der vorstülpbare sackförmige Darm entsendet 5 Paar großer Blindsäcke in die Arme, außerdem sind mehr dorsal unregelmäßigere Interradialcöca vorhanden. Das Genitalsystem zeigt 5strahligen Bau, es finden sich 5 Paar untereinander verbundene Gonaden in den Armwinkeln. Von ihnen gehen kurze, meist dorsal mündende Ausführungsgänge aus. Die Atmung geschieht durch das Wassergefäßsystem, durch die Haut und durch die meist vorhandenen einfachen, verzweigten oder büschelartig zusammenstehenden Hautausstülpungen, die sogenannten Papulae, die zunächst in Zehnzahl (je eine in einer Lücke von primärer Interradial- und Radialplatte) auftreten, sich von dort aber über den Armrücken (Phanerozonier: stenopneustisch) oder weiter zwischen und ventral von den Marginalia ausdehnen (Cryptozonier: adetopneustisch).

Haut. Unter einer für den Durchtritt der weitverbreiteten Wimpern durchsetzten Cuticula liegt das hohe Zylinderepithel der Epidermis, deren Zellen Asterocyaninkörnchen enthalten können und Sinneszellen, becherförmige Schleim- und schlauch- bis maulbeerförmige körnerreiche Giftdrüsen zwischen sich aufweisen. Echinaster sepositus besitzt tief in die Cutis reichende mehrzellige Drüsen.

Die Cutis, die das typische Bindegewebe, ferner Wanderzellen usw. enthält, zerfällt in zwei Lagen, die auf der Dorsalseite von einem (in die Wand der Papulae eindringenden) Schizocöl getrennt werden und von denen die äußere meist das Skelett enthält. Weiter nach innen folgt auf der Apikalseite und zuweilen mehr oder weniger weit ventralwärts eine (Fasern durch das Schizocöl zu den Skelettstücken entsendende, mesenchymatische?) Ring- und eine innere, vom Cölomepithel gebildete, Längsmuskulatur, die sich bei Asterias, Ophidiaster, Culcita, Echinaster, Linckia und Pentacerosarten in den Armen zu

3 Strängen verstärkt zeigt, welche sich nach der Scheibe zu vereinigen und schließlich zentral von allen Seiten zusammenlaufen. Davon zu unterscheiden sind die 2 Muskeln des Armrückens der Notomyota (Ludwig), die proximalwärts nur bis zur 3. bis 8. oberen Marginalplatte reichen und wahrscheinlich ein Schwimmen durch lebhaftes Aufwärtsschlagen der Arme ermöglichen. — Ganz innen wird die Körperwand vom Cölomepithel begrenzt, in dem jede Zelle eine Wimper trägt.

Skelett. Ueber das dorsale Skelett ist noch nachzutragen, daß die Terminalplatte eine ventrale Furche trägt, an der noch wieder eine proximale lokomotorische Nische für die jüngsten Füßchen von einer distalen sensoriellen Nische für Endtentakel und Auge unterschieden werden können. Besonders große Terminalia besitzen Porcellanasteriden, viele Pentagonasteriden und einige Archasteriden. Die Terminalia sind gewöhnlich in ähnlicher Weise wie die oberen Marginalia mit Stacheln bewaffnet. Die primären Radialplatten, die sich außen von den primären Interradialplatten einfügen und das Abschieben der Terminalia beginnen, legen sich mit ihrem proximalen Ende über seitliche Teile der primären Interradialplatten und bilden so eine (bei Asterina, Palmipes und Asterias bleibende) Basis für das dorsale Armskelett. Dieses (bei fertigen Tieren, Echinaster sepositus und Asterina gibbosa) zuweilen regellos erscheinende dorsale Armskelett wird in der Radiallinie von den sekundären „Radialia" gebildet, die von der jederseits benachbarten und auch nach der Zeit der Anlage folgenden Adradialplattenreihe (bei Brisinga fehlend) und den weiter seitlichen Dorsolateralplattenreihen oft auch beim ausgebildeten Tier (Valvaten, viele Zoroasteriden und Archasteriden) deutlich unterscheidbar bleiben. Bei diesen, wie überhaupt allen Plattenreihen der Arme, sind die proximalen Glieder die älteren, während mehr oder weniger dicht hinter der Terminalplatte, wo der Arm überhaupt einen embryonalen Charakter bewahrt, die neuen Glieder angelegt werden. Die Dorsalplatten der Arme neigen dazu, mit ihrem proximalen und medialen Ende sich über ihre Nachbarn dachziegelig hinüberzulegen. Das Sekundärskelett der Scheibe wird von 5 gleich nach den primären Radialia angelegten Centroradialia gebildet, denen weitere jüngere Glieder von dem Centrale her folgen können. Auch seitliche Platten können auf der Scheibe in mehr oder weniger großer Zahl hinzutreten. Bei Cnemidaster wyvillei besteht das ganze Dorsalskelett der Scheibe aus der Zentralplatte, 5 primären Interradial- und Radialplatten; nur wenige Zwischenplatten haben viele Zoroasteriden und Marginasterarten; bei vielen Pentagonasteriden, einzelnen Asteriniden und Pentacerotiden bleiben die Primärplatten wenigstens durch ihre Größe leicht erkennbar. Neben den Sekundärplatten weist das Dorsalskelett noch spät auftretende Konnektivplättchen auf, die sich von innen zwischen die anderen Platten schieben, sie zu einem Netzwerk verbinden und auseinandertreiben, um Raum für die Papulae zu schaffen. Besondere äußere supplementäre Plättchen (mit Stachelbürsten zum Schutz der Papulae) der medialen dorsalen Armzonen von Palmipes scheinen den Basalplättchen der bei Asterina dort vorkommenden Pedizellarien zu entsprechen.

Die bei Phanerozoniern deutlichen, bei den Cryptozoniern (die in der Jugend ein Phanerozoenstadium durchlaufen) sekundär zurücktretenden Marginalia entsprechen in ihrer Zahl nur selten den dorsalen Armplatten (Hacelia und Ophidiaster) oder wenigstens den Radialia (Asterias), sie sind gewöhnlich (außer z. B. bei Luidia ciliaris, sarsi und bei Plutonaster subinermis) auch weniger zahlreich als die Ambulacralia. Die oberen und unteren Randplatten liegen meist direkt übereinander, bei anderen Formen (viele Notomyota) alternieren sie, was die Beweglichkeit in dorsoventraler Richtung zu erleichtern scheint. Meist sind oben, selten unten (Odontaster mediterraneus) 1 bis 2 bis 3 Marginalia weniger vorhanden, zuweilen liegt eine obere und untere an der Armbasis genau interradial (Odontaster mediterraneus, Chaetaster longipes, Pararchaster). Es kommt vor, daß ein oder mehrere Paare von oberen Randplatten dorsal in der Armmitte zusammenstoßen (Styracaster-, Thoracaster-, Hyphalaster- und Nymphasterarten, Pentagonaster placenta, Odontaster mediterraneus). Obere und untere Marginalia können glatt sein oder Körnchen, Dornen und Stacheln tragen (z. B. obere bezw. untere Randstacheln usw.). Zuweilen können die aufeinander folgenden Marginalia ihre enge Aneinanderlagerung aufgeben (Marginaster, Asterina, Palmipes, Brisinga) und sich dachziegelig mit den Proximalrändern über die distalen schieben (Chaetaster, Hacelia, Ophidiaster, Echinaster, Asterias). Selten schieben sich die dorsalen Marginalia über den Oberrand der ventralen (Chaetaster, Hacelia juv.) Randplatten oder umgekehrt (Echinaster). Von den Armwinkeln ausgehend treten gelegentlich zwischen den Marginalia Konnektivplatten (von innen her, Hacelia, Ophidiaster) oder eine oder mehrere Intermarginalplattenreihen in mehr oder weniger regelloser Anordnung auf, letztere überdecken sich und die Marginalia entweder in dorsoventraler Richtung (Asterias rubens und andere Arten) oder umgekehrt (Echinaster sepositus).

Auf die Marginalplatten folgen ventralwärts die nur selten fehlenden (Brisinga coronata) (sekundären), bei pentagonalen Formen reich entwickelten Ventrolateralplatten, sie ordnen sich gewöhnlich in einer (Astropecten, Luidia, Echinaster sepositus, Asterias glacialis, edmundi, richardi) oder in mehreren Längs- und gleichzeitig Querreihen, die zumal in den interbrachialen Bezirken Systeme von ungefähr orthogonalen Trajektorien zu bilden pflegen. Die Ventrolateralplattenreihen können ungefähr soviel Platten aufweisen wie die Ventromarginalia (Luidia, Plutonaster, Marginaster, Asterina, Palmipes, Asterias) oder die Adambulacralia (Astropecten, Luidia, Plutonaster); ursprünglich herrscht aber keine Konkordanz mit jenen Nachbarreihen. Die Ventrolateralplatten sind die jüngsten Stücke des ganzen Skelettes. Die Neubildung geschieht am distalen Ende, selten durch Platteneinschub; beim Vorhandensein mehrerer Längsreihen können entweder die oberen oder seltener die unteren die jüngeren sein (letzteres bei Marginaster capreensis und Asterias tenuispina). Die Platten können übereinander greifen oder für den Durchtritt der Papulae auseinander

gerückt werden; sie sind entweder nackt oder mit Körnchen und Dornen besetzt.

Ambulacralia (Amb.) und Interambulacralia (Iamb.), deren Namen gleichfalls nicht durch fest begründete Homologien zu den Amb. anderer Klassen gerechtfertigt erscheint, bilden das primäre Ambulakralskelett. Sie sind in gleicher Zahl vorhanden und liegen gewöhnlich direkt nebeneinander (oder alternierend), wobei die Adambulacralia den Rand, die breiten Amb. durch ihre Winkelstellung die Flächen der Nahrungsfurche stützen. Bei den meisten Palaeasteriden alternieren die Amb. wenigstens in Mundnähe oder der Armmitte, sonst stehen sie sich von links und rechts gegenüber und bilden zusammen einen sogenannten Wirbel. Sie artikulieren mit dem „Körper" des Wirbelstückes, von dem lateralwärts (distal) der „Fortsatz" ausgeht, an dessen proximaler Seite das zugehörige Füßchen bezw. seine Ampulle durchtritt. Die durch Einbuchtungen der Amb. gebildeten Füßchenporen zwischen den Amb. können auf jeder Seite des Radius eine Reihe bilden (Phanerozonia); beim Vorhandensein zahlreicher gedrängter, schmaler Amb. werden die Poren aber abwechselnd mehr nach innen oder außen gedrängt, so daß auf jeder Seite zwei Füßchenreihen zu stehen scheinen und im ganzen eine „vierreihige Anordnung" zustande kommt (Cryptozonia, z. B. Asteriiden, Heliasteriden). Außen von den Poren für die Füßchenampullen zeigen die Amb. einen distalen und einen proximalen Fortsatz, die mit denjenigen der anstoßenden Platten artikulieren. Im Winkel der Wirbel artikulieren die linken und rechten Amb. und können durch Muskeln am spitzen und stumpfen Winkelende des V gegen- und voneinander bewegt werden, so daß Erweiterung oder Verengerung der Ambulakralfurche eintritt. Außer diesen oberen und unteren Quermuskeln, von denen die unteren stärker sind, über dem Radiärkanal liegen und beim ersten Wirbel in zwei Bündeln vorhanden sind, bleiben noch Muskeln zu erwähnen, die sich zwischen den gelenkig verbundenen Amb. und Adamb. ausspannen, und solche, die die Amb. (an den lateralen Fortsätzen) und die Adamb. untereinander in Längsrichtung verbinden. Die jüngsten Amb.

Fig. 34. Armskelett, Mundskelett und Apikalskelett von Seesternen. 1. Mund- und ventrales Armskelett von Luidia ciliaris. Ganz jung. Am_1 bis Am_3 erste bis dritte Ambulacralplatte. Fp_1, Fp_2 erster bezw. zweiter Füßchenporus. T Terminale, Ad Adambulacralplatte 1, dahinter die zweite, ME Mundeckstück, links zum Teil entfernt, um die Interoralplatte JO zu zeigen. 230:1. 2. Schema eines adambulacralen Peristoms, zweireihige Füßchenporen Fp. uR untere Randplatten, Inframarginalia, vL_1 bis vL_3 Ventrolateralplatten. Sonst wie oben. 3. Schema eines ambulacralen Peristoms und vierreihiger Füßchenordnung. Buchstaben wie oben. 4. Dorsalskelett von Marginaster capreensis. Ohne Stacheln, 15:1. C Centrale, sV sekundäre Verbindungsstücke, CR Centroradialia, JR_1 primäre Interradialplatte, m Madreporenplatte, Vr_1, Vr_2 Verbindungsplatten der Radiala R_1, R_2 mit den primären JR oder den oberen Randplatten oR_1 usw, uR_1, uR_2 erste bezw. zweite untere Randplatte, JB_1 erste Interbrachialplatte, T Terminale, sk sekundäre Kalkplättchen, A After, P Papula, scF sekundäres Zentral-Scheitelfeld. Rf Radialfeld. Nach Ludwig.

liegen unter dem Proximalrand der Terminalplatten. Ungleich den stets von Skelettanhängen freien Amb. tragen die Adamb. an ihrem der Furche zugekehrten Rand immer schützende Furchenstacheln, zu denen (später) oft weiter außen am ventralen Rand noch „subambulakrale" Stacheln oder Granula kommen. Mit dem Alter und proximalwärts im Arm nimmt die Bestachelung zu. — Von innen her legen sich bei manchen Seesternen an die Amb. und Adamb. besondere in der Zahl jenen entsprechende „Supraambulacralia" an, die sich zuweilen (Scytaster) in zwei oder drei Stücke auflösen und mit ihrem lateralen Ende bis zu den Ventrolateralplatten (Chaetaster, Hacelia, Ophidiaster, Linckia, Scytaster), den Inframarginalia (Astropectiniden, Luidia, Ctenodiscus) oder bis zu den oberen Marginalplatten (Pararchaster folini) reichen können. Sie werden spät, aber vor den Ventrolateralplatten angelegt.

Die proximalsten Teile des Ambulakralskelettes bilden ein Peristomskelett, indem interradial eine Verbindung der Elemente verschiedener Radien eintritt. Bei gedrängter Anordnung der Amb. pflegt der erste Wirbel am Peristomrand mehr hervorzutreten als die proximalsten Adamb., die bei der Mehrzahl der anderen Seesterne (interradial) am meisten vorspringen. Im ersten Falle redet man von einem ambulakralen (Mehrzahl der Forcipulata, außer Pedicellasteriden und Brisingiden), im anderen Falle von einem interambulakralen Peristom. Letzterer Zustand ist der ursprünglichere; einige Formen der ersten Gruppe zeigen in der Jugend ein interamb. Peristom. Auch kommen indifferente Zwischenstadien vor (Odinia, Labidiaster).

Die vordersten Amb. entsenden einen proximalen Fortsatz zum Abschluß des vordersten Ambulakralporus, diese von beiden Seiten in den Interradien sich nähernden Fortsätze sind durch Muskeln verbunden. Die in den Interradien zusammenstoßenden, spitz dreieckigen, großen, vordersten Adamb. werden als Mundeckplatten bezeichnet, sie sind ebenfalls durch Muskeln verbunden und unterscheiden sich dadurch (und durch Fortsätze zu den vordersten Amb.) von den folgenden proximalen Adamb., von denen auch noch 3 bis 5 mit den entsprechenden des benachbarten Armes in den Interradien zusammenkommen können (Asterias tenuispina, glacialis). Die Mundeckplatten tragen auch subambulakrale („Oberflächen"-) und früher angelegte „Furchen"-Randstacheln, von letzteren ist der proximalste oft als Eckstachel besonders ausgebildet.

In den interradialen Winkeln zwischen den vordersten Adamb. liegt tief und außen nur selten (Styracaster, Hyphalaster, Thoracaster, einige Porcellanasterarten) teilweise hervortretend je eine rundliche, ziemlich große Platte, die den dorsoventralen Septen zum Ansatz dient. Sie wird als unpaare Interambulakralplatte, als Odontophor, als Interoralplatte oder als Oralplatte bezeichnet. Der letzte Name deutet eine Homologie mit den Oralia anderer Echinodermen an, die aber ebensowenig bewiesen ist wie die der primären Radialplatten mit den Radialia, der primären Interradialia mit den Basalia und gar der ersten Centroradialia mit den Infrabasalia und der Zentralplatte mit dem Centrodorsale oder dem Dorsocentrale der Crinoiden.

Zum äußeren Skelett zählt man die Stacheln, Dornen, Schuppen, Körner, Pedizellarien, Wimperstacheln und cribriformen Organe. Die bei den Valvaten (Porania) fehlenden und dort durch eventuell abgegliederte Fortsätze der Hauptplatten ersetzten (Pentaceros muricatus und belli) echten beweglichen Stacheln finden sich hauptsächlich auf den Marginalien und dorsalen Platten. Ihre Haut ist oft an der Spitze abgescheuert. Der Stachel sitzt dem Stachelhöcker (oder Pfanne) der Platte mit einer Gelenkfläche auf und ist durch eine muskulöse Gelenkkapsel damit verbunden. Bei Acanthaster und Pentacerosarten und bei Echinaster und Asterias besitzen die Gelenkachsen Grübchen, die von einem zentralen Ligament herrühren. Auf den Ventromarginalplatten von Asterias sind die Grübchen in die Breite gezogen.

Von den Stacheln manchmal nicht scharf zu unterscheiden (Paxillosa, Astropectiniden) sind die Dornen, die im allgemeinen durch ihre Anordnung in Gruppen charakterisiert sind und besonders auf den Adamb. und den dorsalen und ventralen intermediären Platten vorkommen. Bei Solasteriden bilden sie enge Bündel, die von gemeinsamer Basis ausgehen. Durch stärkeres Divergieren können sie bei Pterasteriden (Velata) zeltstangenähnlich werden und ein durch Hautverschmelzung mehr oder weniger ausgedehntes sekundäres Hautdach tragen. Bei den Paxillosa werden die Dornen in einem oder mehreren konzentrischen Kreisen geordnet und dann noch auf einer kurz säulenförmigen Erhebung der Platte getragen, einen sogenannten Paxillus bildend. Die Paxillenblasen und Säulen sind echte Hauptplatten der Körperwand, verhalten sich auch in ihrer Anordnung, ihrer Vermehrung von den Armenden her (selten Einschiebung) usw. so; bei Luidia werden die Supramarginalia zu Paxillen, während die unteren Randplatten bei ihrer Anlage paxillenähnlich sind. Die Haut der Dornen ist drüsenreich und nervenarm, ihre Muskulatur (Ambulakralstacheln von Asterias glacialis) in einen kurzen dichten Senker und einen längeren Heber differenziert. Auch die Paxillendornen können sich heben und senken und sich damit schützend schirmförmig ausbreiten.

Die Dornen sind durch Uebergänge mit abgeflachten, gleichfalls gelenkig aufsitzenden Schuppen und mit den kurzen, meist die Skelettplatten dicht besetzenden Körnern (Valvata, Acanthaster, Archaster, Astropectiniden, Zoroasteriden und Stichasteriden) verbunden. Die Körner sind manchmal nicht auf die Skelettplatten beschränkt, sondern können eine allgemeine Granulation der Haut bilden (Hacelia, Ophidiaster).

Pedizellarien. Man teilt die (bei Solasteriden, Echinasteriden und Mithrodiiden fehlenden) Greifzangen der Seesterne in zwei Gruppen ein, in die sitzenden ungestielten und die gestielten, deren Zangenstücke noch einem besonderen Basalstück aufsitzen.

Die sitzenden Pedizellarien sind wohl unzweifelhaft durch Zusammenrücken benachbarter Dornen oder Granula entstanden, wie sich bei Asterina und Acanthaster schön verfolgen läßt. Es bilden sich dabei aus den Muskelkapseln der Dornen zwei äußere Abduktoren und ein

direkt von einem Dorn zum anderen laufender Adduktor. Man teilt sie folgendermaßen ein:

I. Sitzende Pedizellarien, ohne Basalstück.

1. Nicht alveoläre. Die Zangen sind nicht in einer Alveole, sondern direkt auf der Platte beweglich.

a) Zangenförmige, mit 2 Zangen. Bei Spinulosa durch Zusammenrücken von Dornen, bei Paxillosa (Luidia, Bathybiaster, Archaster) aus Paxillen entstehend.

b) Büschelförmige, mit mehreren Zangen auf derselben Skelettplatte. Bei Paxillosa (Luidiaarten, Asterodon, Pectinaster, Crenaster) aus Paxillen gebildet, deren Dornen gegeneinander beweglich werden.

c) Kammförmige, mit 2 Zangenreihen von den Enden zweier zusammenstoßender Platten. Cheiraster (Notomyota).

d) Streifenförmige, ähnlich, aus Granulareihen entstanden. Astrogonium.

2. Alveoläre. Die Zangenbacken sitzen, mit einem Bindegewebsfaserbündel befestigt, in einer Alveole der Platte, nur bei Valvata. Entstehen aus Körnern.

a) Salzfaßförmige. Alveole in zwei Gruben geteilt, Zangen höher als breit. Linckiidae, besonders Ophidiaster.

b) Spatelförmige. Zangen spatelförmig, die Alveolengruben nur schwach, viele Pentagonasteridae.

c) Klappenförmige. Alveole ungeteilt. Zangenstücke meist breiter als hoch. Gewöhnlich 2, selten 3 bis 4 Zangenstücke. Antheneidae, Gymnasteridae, Pentacerotidae.

Den sitzenden Pedizellarien stehen die zarteren gestielten, mit gezähnten Zangen versehenen Pedizellarien scharf gegenüber:

II. Gestielte Pedizellarien mit besonderem Basalstück in Gestalt eines abgerundeten, mit der großen Seite nach oben gekehrten, stumpfwinkeligen Dreiecks. Nur bei Forcipulata.

1. Gerade, mit einfachen Zangen, gewöhnlich in Zwei-, ausnahmsweise (Asterias glacialis) in Dreizahl.

2. Gekreuzte. Die unteren Enden der Zangenstücke überkreuzen sich (an verschiedenen Seiten des Basalstückes).

Die gestielten Pedizellarien haben ein drüsen- und nervenzellenreiches Epithel mit darunterliegender Nervenfaserlage. Im Stiel läuft ein besonderer Bindegewebsstrang, der sich bei den geraden an das Basalstück ansetzt, bei den gekreuzten sich gabelt und an die inneren Enden der Zangenstücke geht. Es sind ein Paar äußere Abduktoren vorhanden, die von der Basalplatte zur Außenseite der Zangen verlaufen und 2 Paar Adduktoren, von denen das lange Paar von der Basalplattenmitte zu der Spitze (durch einen Kanal) der Zangen, das kurze von derselben Stelle zu einem niedrigeren Punkte und bei den gekreuzten zu den unteren „Handhaben" läuft. Das Basalstück trägt bei den geraden eine quere Mittelleiste, bei den gekreuzten kompliziertere Apophysen.

Bei Astropecten und Luidia finden sich an den zugekehrten Rändern der Marginalplatten zahlreiche dichtgestellte, mit Bindegewebe und Muskeln befestigte Dörnchen, die ein sehr hohes Wimperepithel mit sehr langen Wimperhaaren tragen. Sie werden „Wimperstacheln" genannt.

Ihnen homolog sind wahrscheinlich die „cribriformen" Organe auf den Randplatten der Porcellanasteriden, die sich in den Armwinkeln auf den vertikalen Suturen der Marginalia finden (Caulaster, manche Porcellanaster) und auch der Reihe nach auf den folgenden Suturen distalwärts auftreten können (Hyphalaster, Thoracaster, Pseudaster, Ctenodiscus).

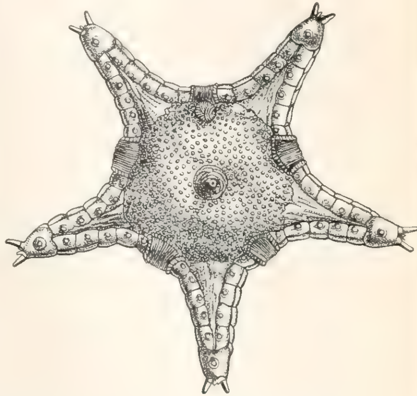


Fig. 35. Porcellanaster caeruleus von der Dorsalseite. Beachte: Madreporenplatte, Analpapille, Terminalia und Marginalia und die cribriformen Organe. Nach W. Thomson.

Die cribriformen Organe bestehen aus dicht gestellten Falten der Körperwand, die mit Wimperepithel überzogen und von mehr oder weniger zahlreichen Kalkstachelchen im Innern gestützt werden. Die Falten können zumal an ihrem oberen Ende in einzelne Papillen aufgelöst werden und in die Dornen der Nachbarschaft (dorsal) übergehen, seitlich und unten sind die Organe gewöhnlich von einem geschuppten Rand abgeschlossen. Im m. p. I. sind sie manchmal größer, nach der Spitze der Arme zu pflegen sie an Größe abzunehmen. — Kalkkörper der Ambulakralanhänge. Kalkkörper in den Füßchen scheinen nur bei Valvaten aufzutreten, man findet gewöhnlich einen Kranz (nicht wie bei Holothurien eine Platte) von gegitterten Kalkkörpern in den Endscheiben (einreihig geordnet bei Ophidiaster, Linckia, Goniodiscus, gedrängt bei Gymnasteria, Pentaceros und Culcita, welch letztere Formen auch noch Stäbchen oder Gitterplättchen in den Seitenwänden aufweisen.

Nervensystem. Sämtliche 3 Nervensysteme sind epithelialer Natur und bestehen aus Nervenfasern und Ganglienzellen, die zwischen (elastischen?) Stützfasern verlaufen, die seitlich oder meist am freien Ende ihre Bildungszellen tragen. Diese Zellen bilden unter der freien Epitheloberfläche eine dichte Zellenlage, die das alte Epithel repräsentiert. Das dorsale

Nervensystem soll in dieser Weise mit dem Cölomepithel der Rückenseite zusammenhängen („Entoneuralsystem") und die Muskulatur des Rückens versorgen, der es innen breit anliegt. Die 5 radiären Bänder treffen sich in der Mitte der Dorsalseite. Dieses Nervensystem wurde von Astropecten aurantiacus, Echinaster sepositus, Asterias glacialis und tenuispina nachgewiesen, konnte aber bei anderen Arten (Asterina gibbosa und Asterias rubens) nicht gefunden werden.

Das tieferliegende oder hyponeurale Nervensystem ist nur ungenügend bekannt. Sicher ist, daß sich interradial im äußeren Ringsinus und in den beiden radiären Sinus (Hyponeuralkanälen) in Höhe der Wirbel zellige und, wie es scheint, auch Fasern führende Verdickungen finden; ob dieselben aber untereinander kontinuierlich zusammenhängen, ob speziell in den Armen die Trennungssepten in den radiären Sinus in den Zwischenwirbelebenen von Nervenfasern überbrückt werden, ist nicht völlig überzeugend bewiesen. Die Hyponeuralnerven sollen vor allem die Muskeln des Ambulakralskeletts und die interradialen Muskeln des Peristoms versorgen.

Das „ektoneurale", wohlausgebildete Nervensystem, dessen mehr oder weniger pentagonaler zentraler Ring wie seine 5 Hauptstämme oft schon mit bloßem Auge (an ihrer gelben Farbe) erkannt werden können, steht in engem Zusammenhang mit einem (nach Mangold physiologisch nicht nachweisbaren) Hautnervennetz, dessen Stränge überall in Konnex mit dem äußeren Epithel und besonders an den Plattengrenzen angetroffen werden, in den Armen vorwiegend längs verlaufen und die Stacheln, Pedizellarien und Papulae versorgen. Außer auf diesen Organen sollen (Hamann, Meyer gegen Cuénot) auch noch besondere Sinneszellen mit Nervenfortsatz in dem Epithel des Nerven selbst wie auch auf den genannten Organen, in den Füßchenenden und überhaupt in der ganzen Epidermis vorhanden sein. In die Füßchen ziehen zahlreiche Nervenstränge, zuweilen eine kontinuierliche Nervenlage bildend und unter der Endscheibe zu einem besonderen Ring anschwellend. Im Epithel des ektoneuralen Nervensystems finden sich Sinneszellen, 2 Arten becher- sowie maulbeerförmige Körnerzellendrüsen. Die Stützzellen enthalten gelbes Pigment und tragen Geißeln, welche die dreischichtige Cuticula durchsetzen. Auch der mit hohem Sinnesepithel und darunter verlaufenden Fasern versehene Endtentakel des Wassergefäßsystems zeigt an seiner Unterseite Bewimperung. Die stetig bewegten Endtentakel sind hervorragende Sinnesorgane, sie dienen in erster Linie der Aufnahme chemischer Reize („Geruch"), die jedoch auch von der Ambulakralfurche aufgenommen werden können. An der ventralen Basis des Endtentakels, die bei dem mit erhobenen Armenden kriechenden Seestern nicht ganz nach unten gerichtet ist, findet sich auch ein deutlicher roter Augenfleck. Der auf den Endtentakel übertretende Radiärnerv bildet hier ein „Augenpolster", in dem im einfachsten Falle neben den Stütz- und Sinneszellen Retinazellen angetroffen werden, welche an ihrem äußeren Ende ein kölbchenförmiges Stäbchen tragen, in ihrem zylindrischen Hauptteil mit einem roten Lipochrom in Tröpfchen dicht erfüllt sind und sich in einen Fortsatz ausziehen, der in der Faserschicht des Radialnervenpolsters verschwindet (Astropecten pentacanthus und mülleri, Plutonaster granulosus). Diese roten Zellen sind auch hier schon in Gruppen etwas konzentriert, aber auch dazwischen noch vorhanden. Luidia ciliaris (und Plutonaster spatuliger, Benthopecten (Pararchaster) spinuliger, Dytaster demonstrans) leitet zu dem folgenden Augentypus über (Astropecten aurantiacus und bispinosus, Astrogonium granulare, Petricia (Asteropsis) pulvillus, Anseropoda (Palmipes) membranaceus, Solaster papposus, Pteraster militaris, Dipsacaster spec. und Goniaster (Pentagonaster) ernesti, bei dem das Pigment des Polsters auf einzelne Flecken beschränkt ist, in denen die Retinazellengruppe sich zu einer Grube eingesenkt hat. Diese Grube ist von einem gallertigen Emplem erfüllt und wird von der Cuticula außen abgeschlossen. Die Stützzellen sind hier von der Einsenkung auseinander gedrängt, laufen aber mit ihren obersten Enden wieder zusammen, um über der Grube die Cuticula zu bilden, an die sie bei dem dritten vorkommenden Typus unten noch eine Linse ansetzt (Echinaster sepositus, Asterina gibbosa, Asteracanthion rubens, Asterias mülleri, glacialis, tenuispina, Persephonaster sp.). Durch die Retinazellen laufen Neurofibrillenbündel, die in dem erwähnten Stäbchen ausstrahlen. Bei Tiefsee-Seesternen können die Augen fehlen (Porcellanasteriden, Zoroasteriden, 463 bis 5868 m), teilweisen Schwund erkennen lassen (Plutonasters patuliger und granulosus), der zuweilen nur das Augenpolster (Cheiraster agassizii) übrig läßt, oder aber erhalten bleiben (viele Archasteriden, Astropectiniden und Pentagonasteriden, 628 bis 3667 m).

Wassergefäßsystem. Der Ringkanal, der apikalwärts von den beiden Ringsinus läuft und als Wulst in die Leibeshöhle vorspringt, besitzt ein Epithel kubischer Zellen mit je einer Wimper, keine oder nur spärliche (Ring-) Muskelfasern, eine dicke Bindegewebsschicht und an seiner Cölomseite einen Ueberzug von Leibeshöhlenepithel. Er besitzt keine (Asterias rubens, glacialis, Cribrella oculata, Echinaster sepositus), eine einzige (Asterina gibbosa usw.), in jedem Interradius außer in dem des Steinkanals eine Polische Blase (Luidia ciliaris, Plutonaster subinermis, alle Notomyota außer Pararchaster spinuliger, der auch dort eine besitzt) oder in jedem Interradius eine und im m. p. I. jederseits vom Steinkanal eine oder endlich in jedem Interradius ein und im madreporen Interradius 2 Bündel von Polischen Blasen (Astropectiniden). Die Bündel pflegen mit gemeinsamem Kanal zu münden. Die Polischen Blasen besitzen unter dem inneren Epithel eine starke Ringmuskularis, gelegentlich auch einige Längsfasern.

Außer den Polischen Blasen sitzen in jedem Interradius 2 (Astropecten aurantiacus usw.) oder überall 2, aber in dem des Steinkanals nur ein (Asterias rubens, glacialis usw.) (rechtes) Tiedemannsches Körperchen (Fig. 36) an der Leibeshöhlenseite des Wassergefäßringes. In jedes Körperchen läuft eine Ausstülpung des Ringes, die sich sogleich in zahlreiche gerade, mit ihren Wandungen verschmolzene Röhren teilt, die ungefähr senkrecht zur Oberfläche das Bindegewebe der Körperchen durchsetzen und

blind endigen. Das innere Epithel trägt Wimpern, Muskeln fehlen. Außen findet sich natürlich ein Ueberzug von dem wimpernden Cölomepithel.

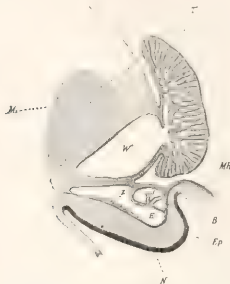


Fig. 36. Interradialer Vertikalschnitt durch den Peristomrand von Asterias rubens L. W Wassergefäßring mit Tiedemannschem Körper T, N epineuraler Nervenring mit äußerer Lage von Stützzellenkernen Ep, Z hyponeurale Nervenlage, E äußerer, J innerer oraler Ringsinus, B Ringblutlakune, Mh Mundhaut, Mi interradialer Peristommuskel. 40:1. Nach Ludwig.

Der Steinkanal liegt eingebettet in den axialen Sinus, von dem er sein Außenepithel erhält, unter letzterem folgt eine dicke, stark verkalkte Bindegewebsschicht und endlich das hohe innere Wimperepithel. In der Jugend ist das Lumen einfach rund, später aber bildet sich an der der Körperachse des Tieres zugewendeten Seite ein in das Lumen eindringender, erst in der Nähe des Ringkanals verstreichender Längswulst (mit niedrigerem Epithel) des inneren Epithels und des Bindegewebes (Echinaster sepositus, purpureus, Brisinga coronata), der sich, im Zentrum angekommen, bei anderen Arten in zwei gewöhnlich spiralig eingerollte Wülste teilen kann (Cribrella oculata, Asterina gibbosa, Palmipes membranaceus, Crossaster

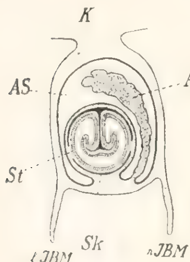


Fig. 37. Schema des Axialkomplexes eines Seesternes. K Körperwand, lJBM und rJBM linke und rechte Interbrachialseptumlamelle, As Axialsinus, AO Axialorgan, St Steinkanal(epithel) mit Längswulst und Skelettstücken SK. Original.

papposus, Asterias rubens, glacialis, Pentaceros turritus, Gymnasteria carinifera). Bei Astropectenarten kann der Primärwulst bis zur gegenüberliegenden Wand durchwachsen, so den Steinkanal zerteilen und von seiner Mitte aus wiederum sekundär Wülste treiben, die sich ihrerseits spalten und aufrollen (Astropecten spinulosus usw.) und schließlich weitere Zerteilungen des Lumens bedingen können (Astropecten aurantiacus, Luidia ciliaris, Arten von Culcita und Ophidiaster). Das Kalkskelett des Steinkanals besteht aus aufeinanderfolgenden Ringen, von denen jeder wieder aus einer axialen und abaxialen Hälfte besteht. Von der größeren abaxialen Hälfte entspringen dann Kalkfortsätze genau in der Form jener oben beschriebenen Wülste, in deren Bindegewebslage sie gebildet werden.

Nach der Dorsalseite nimmt der Umfang des Steinkanals zu, um bei vielen Arten unter der Madreporenplatte zu einer manchmal außen eingebuchteten Ampulle (Asterias rubens und glacialis) anzuschwellen. Die Madreporenplatte, die bei ganz jungen Tieren nur eine Oeffnung aufweist, zeigt später am Grunde mehr oder weniger weit zentral vordringender, oberflächlicher Rinnen sehr zahlreiche Poren, von denen je ein Kanälchen in die Tiefe führt, sich dort aber mit den Porenkanälchen derselben Furche vereinigt, zentralwärts noch andere Sammelkanälchen in sich aufnimmt, um schließlich in die Ampulle zu münden. Im Gegensatz zu dem hohen Epithel der Madreporenplatte und des Steinkanals ist das Wimperepithel der Porenkanälchen sehr niedrig. Einige Kanälchen scheinen in den axialen Sinus statt in den Steinkanal zu führen, auch sind die beiden letzteren, die embryonal kommunizieren, auch durch Porenkommunikation im Madreporit und direkt durch eine Kommunikation am oberen Steinkanalende (Goto) verbunden. — Bei Cryptozoniern (Asteriiden, Stichasteriden, Echinasteriden, Linckiiden) findet man zuweilen 2 oder mehrere Madreporenplatten und Steinkanäle (mit Axialkomplex!), die dann gewöhnlich in verschiedenen Interradien liegen. Die Erscheinung kann mehr oder weniger gelegentlich oder gesetzmäßig bei einer Art sein. Besonders eklatant findet sie sich bei Acanthasterarten (echinites und ellisii), die bei vermehrter Armzahl (11 bis 20) auch 5 bis 16 Madreporenplatten haben, doch ist die Madreporenplattenvermehrung nicht an die Armvermehrung gebunden; denn wir finden einerseits bei den vielarmigen Solaster, Heliaster, Labidiaster nur 1, andererseits bei 5armigen (Asterias, Ophidiaster, Linckiaarten) öfters mehrere Madreporite. Selten ist ein Zerfall einer ursprünglichen Madreporenplatte in mehrere Teile (wobei der Steinkanal nicht vermehrt ist).

Die Radiärkanäle laufen in Bindegewebe eingebettet in den Winkeln der Wirbelstücke und werden dort von den unteren, sie von den radiären Sinus trennenden Quermuskeln (bei Brisinga von einer Kalkspange der Amb.) etwas eingeengt, während sie in den Zwischenwirbelregionen etwas breiter werden. Die Radiärkanäle besitzen keine oder nur eine schwache (Ring-) Muskulatur. Der Endtentakel weist dagegen kräftige Längsmuskelfasern auf. Die Füßchenkanäle, die immer an gegenüberliegenden Stellen abgehen, zeigen kräftige Ringmuskulatur; sie ragen mit verengter Spitze und senkrechter, spaltförmiger Oeffnung in eine Erweiterung der Verbindung von Füßchen und Ampulle hinein und bilden so ein mit Muskeln versehenes Ventil,

das sich schließen kann, wenn sich die Flüssigkeit in jener Erweiterung um die Spitze staut und deren Wände zusammenpreßt. Die durch die Ambulakralporen zwischen den Wirbeln nach innen durchtretenden Ampullen haben kräftige Ringmuskulatur (natürlich auch Bindegewebe und Cölomüberzug), sie sind bei Asterias etwa kugelig, bei anderen seitlich zusammengedrückt und in der Mitte etwas eingeschnürt (Cribrella, Echinaster, Luidia) und endlich bei Asterina, Crossaster, Palmipes, Pentaceros, Gymnasteria, Culcita bis auf das proximalste Paar zweilappig, bei Astropecten usw. (Astropectinidae, Goniopectinidae, Luidiidae, Archasteridae, Goniasteridae) endlich alle zweiteilig.

Die Füßchen, die sich von der Armspitze her vermehren und dort einfach papillenförmig und mit starker ektodermaler Nervenschicht versehen sind (bei Crossaster papposus mit Wärzchen und Sinneshärchen), haben bei Astropectiniden, Goniopectinidae, Luidiidae und Porcellanasteridae trotz ihrer Benutzung zum Festheften ihr einfach kegelförmiges Ende alle behalten, bekommen aber im allgemeinen eine typische Saugscheibe. Im äußeren Epithel liegen Sinnes- und Drüsenzellen. Das Bindegewebe ist durch ein Schizocöl in eine äußere Längs- und eine innere Querfaserlage geteilt. Weiter nach innen folgt die kräftige Längsmuscularis und endlich das typische innere Wimperepithel. Die Längsmuskelfasern laufen an der Spitze im Mittelpunkt der Scheibe zusammen, die auch noch besondere Radiärmuskelfasern besitzen soll. Die Scheibe kann durch Schwellung des Wassergefäßkanals irgendwo angedrückt werden, beim Anziehen der Längsmuskulatur am Zentrum der Scheibe wirkt dieselbe dann als Saugscheibe, so daß sich das Tier nachziehen kann. Im zusammengezogenen Zustande verschwinden die sonst recht langen Füßchen in der Ambulakralfurche, und unter ihrem Stachelschutz. In der eiweißhaltigen Inhaltsflüssigkeit des Wassergefäßsystems findet man zahlreiche, oft zu Syncytien verbundene Amöbocyten mit Pseudopodien, die besonders in der Jugend viele Pigmentkörnchen aufweisen, violette Vakuolen enthalten können usw.

System der Sinus. Der axiale Sinus, der oben direkt oder indirekt mit dem Steinkanal kommuniziert und ein „Infundibulum" um die Madreporenblase bildet, enthält den Steinkanal, der von der Innen-, d. h. der Körperachsenseite her tief in den Sinus eingedrückt und von dessen eingeschlagenen Wand umgeben ist (Fig. 37). Oral hängt der axiale Sinus mit dem inneren Oralsinus zusammen, der ganz oder teilweise von ihm aus gebildet wird. Eine schräge Wand trennt ihn vom äußeren geräumigeren Oralsinus (Fig. 36) (Pseudohämal- oder Hyponeuralring), der (zuweilen gemeinsam mit dem inneren Ring) durch 4 Ausstülpungen des linken hinteren Enterocöls und eine des Axialorgans gebildet wird oder mesenchymatischen Ursprung hat. Im ersteren Falle wachsen die interradialen Hohlräume den Radien zu und wenden sich dort in die Arme hinein, so daß ursprünglich die Trennungswand der beiden Armsinus (Fig. 38, 5) auch den äußerlich geschlossenen äußeren Oralsinus noch in seine ursprünglichen Komponenten zerlegt und bis zur Wand des gesonderten inneren Oralsinus durchdringt (Asterina gibbosa). Die peripheren Teile der radiären Sinus entstehen als einzelne Mesenchymhaufen zwischen den Füßchen (Goto), sie erhalten später Höhlungen, stoßen mit ihren Wänden aneinander und scheinen auf diese Weise die Quersepten zu bilden, die sich in den radiären Sinus in Höhe der Füßchenpaare finden. Bei Asterias pallida bilden die proximalsten Mesenchymsäckchen durch ringförmiges Auswachsen in die Interradien und dortige Verschmelzung mit den Nachbarn sogar auch den äußeren Ringsinus. Dieser mesenchymatische Ursprung der Sinus ist vielleicht sekundär, gegenüber einer ursprünglich cölomatischen Herkunft.

Parallel zu den radiären Sinus laufen außen von den Füßchenreihen noch die marginalen Sinus (Fig. 38, 19), die durch Anastomosen mit den Radiärsinus, weiter mit dem Hautschizocöl und dem Schizocöl der Füßchen in Verbindung stehen. Auch die radiären Sinus entsenden Queräste zu den Füßchen, die mit den Anastomosen zu den marginalen Sinus abwechseln.

Der aborale Sinus (Fig. 39, Rs) wächst vom Steinkanalinterradius ausgehend zu einem dorsalen Fünfeck aus, das die Interradialsepten durchsetzt oder umgeht; er entsendet 10 Hohlräume (Fig. 39, Rs_1) zu den Geschlechtsorganen.

Leibeshöhle. Die auch in den Armen ziemlich geräumige Leibeshöhle enthält dieselbe eiweißhaltige und Amöbocyten führende Flüssigkeit wie das Wassergefäßsystem, die kubischen oder flachen Zellen ihrer Wand tragen je eine Wimper. Die Cölomwand überzieht alle in die Leibeshöhle vorspringenden Organe, wie Darm, Geschlechtsorgane usw. Sie bildet folgende Mesenterien: 1. 5 interradiale Mesenterien, die von den primären Interradialplatten auf der Dorsalseite nach der Oralseite ziehen, den Darm aber nicht erreichen, sondern zentralwärts mit freiem Rand endigen. 2. 10 × 2 Mesenterien (Fig. 38, 24), die die Radialcöca des Darmes an der dorsalen Armwand befestigen, am distalen Ende zu je zweien ineinander übergehen und einen kleinen (als Ausstülpung des dorsalen = r. h. Coeloms zu deutenden) intermesenterialen Divertikel bilden, zentralwärts aber frei endigen. 3. 5 Paar ventrale Magenmesenterien, die adradial von den ersten Adambulacralia zur ventralen Magenseite hinziehen und als Retraktoren für den ausgestülpten Magen funktionieren. 4. 5 dorsale Magenmesenterien, die radial zwischen den Cöcalmesenterien oder in 5 Paaren in Verlängerung der Cöcalmesenterien entspringen und sich an die dorsale Magenwand ansetzen. — Das Cölom scheint mit dem Hautschizocöl in Verbindung zu stehen.

Atmungsorgane. Papulae. Die Papulae sind kontraktile, außen und innen bewimperte Ausstülpungen der Körperwand, deren Lumen mit der Leibeshöhle kommuniziert (Fig. 38, 11) und die sich zwischen den Maschen des Skeletts nach außen vorschieben (Fig. 34, 4, P). Sie besitzen eine Längsmuskelschicht, die mit der Quermuskulatur der Körperwand zusammenhängt und eine dem inneren Epithel direkt aufliegende Ringfaserschicht, die sich in die Längsfaserschicht der Körperwand fortsetzt. Des Gasaustausches wegen ist die Bindegewebsschicht außerordentlich dünn und frei von Verkalkungen. Basal, in der eigentlichen Körperwand, bildet sich ein großer ringförmiger Spaltraum (Fig. 38, 15)

in derselben, der vielleicht als Teil des allgemeinen Hautschizocöls angesehen werden kann und die Zurückziehung der Papulae, die bei Beunruhigung der Tiere eintritt, erleichtert. Die ersten 10 Papulae stehen in den ersten 10 Armfeldern, d. h. distal rechts und links von den ersten Interradialia. Zuweilen bleiben die Papulae auf die seitlichen Zonen der Armbasen beschränkt (Astropecten, Luidia sarsi), sogenannte Papularien bildend (die demnach primitive Einrichtungen sind, Pararchasteriden). Meist findet aber eine Ausdehnung über den ganzen Armrücken und später (z. B. noch nicht bei Pentagonaster hystricis und Odontaster mediterraneus) auch über die Scheibenmitte statt. Die großen oberen Marginalplatten der Phanerozonier pflegen dann dem weiteren Vordringen der Kiemenbläschen Einhalt zu tun (stenopneustische Formen), während bei den Cryptozoniern eine Ausbreitung in intermarginale und ventrolaterale Maschen als letztes Stadium erreicht wird (adetopneustische Formen). Genau decken sich diese Begriffe nicht; Echinaster ist z. B. stenopneustisch geblieben, wie überhaupt die Cryptozonier ein stenopneustisches Jugendstadium zu durchlaufen scheinen. Die Papulae werden relativ spät angelegt. Die ontogenetische Ausbreitung der Papulae entspricht im allgemeinen den Wachstumsverhältnissen der Seesternarme und der Scheibe. Bei der durch die Verkümmerung des Dorsal- und Marginalskelettes oben sehr dünnhäutig gewordenen Brisinga fehlen die Kiemen, ein offenbar sekundäres Verhalten, da die nahe verwandte Odinia mit derberer Rückenseite auch die Kiemen aufweist.

Die Papulae können einfach fingerförmig (z. B. Astropecten usw.), büschelförmig (Echinaster sepositus usw.) oder viellappig (Luidia) sein, auch kann in einer Skelettlücke (nacheinander) eine ganze Gruppe von fingerförmigen Papulae durchtreten (Asterias glacialis usw.). Durch die dünne Papulawand scheinen Exkretionswanderzellen auszuwandern.

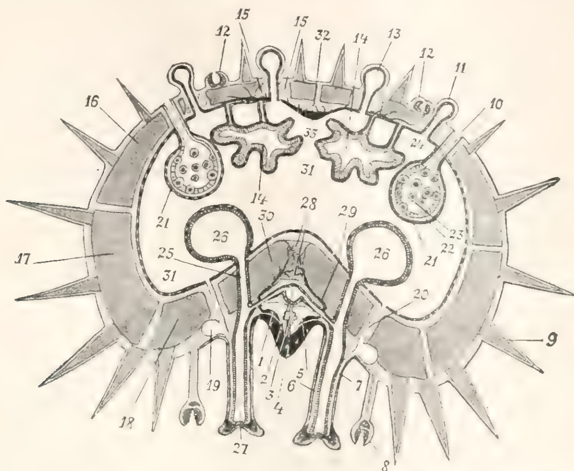


Fig. 38. Armquerschnitt eines Seesterns, schematisch. 1 hyponeurale („tieferliegende") Nervenmassen, 2 Radiarkanal, 3 radiare Blutlakune, 4 epineuraler Radiarnerv, 5 radiarer Sinus, 6 und 7 Füßchensinus, 8 gestielte Pedizellarie, 9 Stachel, 10 Geschlechtsoffnung, 11 Papula, 12 sitzende Pedizellarie, 13 coelomatischer Hohlraum der Papula, 14 radialer Magenblindsack, 15 Schizocöl der Papulabasis, 16 Supramarginale, 17 Inframarginale, 18 Adambulakralplatte, 19 marginaler Sinus (mit Kommunikation zur Leibeshöhle), 20, 21 Cölomepithel, 22 Genitalsinus oder Schizocöl?, 23 Gonade, 24 Mesenterien der radiären Blindsäcke, 25 Kanal zur Füßchenampulle 26, 27 Füßchenhohlraum (-kanal), 28 obere und untere Wirbelquermuskeln, 29 motorische Aeste des Hyponeuralnervensystems, 30 Ambulacralia (Wirbelhaltten), 31 Cölom, 32 dorsaler Armlängsmuskel, 33 apikaler (dorsaler) Radiärnervenstrang. Nach Lang.

Blutgefäßsystem. Ein ringförmiges Lakunengeflecht läuft in dem Septum von innerem und äußerem oralem Sinus (Fig. 36, B). Es entsendet 5 radiäre Lakunengeflechte (Fig. 38, 3), die sich durch das Längsseptum der radiären Sinus hinziehen und in besonderen kleinen dreieckigen Horizontalsepten die Sinus durchsetzen, deren Epithel sie immer vor sich hintreiben, um damit umgeben an der Innenseite der Füßchen aufzusteigen. Die mit der Ringlakune kommunizierende Axiallakune liegt im Axialorgan, einer lakunären Bindegewebsmasse, die das Epithel des Axialsinus neben dem Steinkanal tief eintreibt und von kleineren Einstülpungen jenes umhüllenden Sinusepithels eine zerklüftete Oberfläche erhält (Fig. 37, AO). Das Axialorgan soll in seinem Basalteil als Speicher-

niere, im mittleren Teil als Amöbocyten bildendes Organ funktionieren und in einem seitlichen dorsalen Teile kontraktil sein. Die Magenwand enthält ein Netzwerk von Blutlakunen, die ihr Zentrum in einem äquatorialen, pentagonalen Darmringgefäß haben, das durch 2 Gefäße mit der Axiallakune verbunden ist und je 2 Gefäße dorsal auf jeden der 10 Blindsäcke entsendet, wo dieselben mit feineren Geflechten der Wand in Zusammenhang stehen. Die aborale Lakune ist in den aboralen Sinus eingedrückt und wird von den eingedrückten Wänden wie an einem Mesenterium getragen. Von der pentagonal bis ringförmigen aboralen Lakune gehen die Genitallakunen aus (Fig. 39, Rs u. Rs_1).

Verdauungsorgane. Von der Mitte der Peristommembran führt der Mund durch einen bei Echinaster und Cribrella mit 5 radialen und 5 interradialen Taschen besetzten Oesophagus in den weiten Magen, der durch eine Ringfurche in einen dorsalen und ventralen Teil zerfällt. Von jenem gehen die radiären Blindsackpaare (Fig. 39 Db und 38, 14) ab, die niemals fehlen, bei Vermehrung der Armzahl mit vervielfältigt werden und zuweilen (Culcita, Notomyota) ohne vorherige paarige Vereinigung in den Magen münden. Sie sitzen mit einfachem Stiel an, zeigen aber distalwärts Verzweigungen, die noch weiter verzweigt zu sein pflegen. Ventral an ihrer proximalen Basis findet sich ein längliches Reservoir, die Tiedemannsche Tasche. Dorsal von den radiären Blindsäcken entspringen vom Magenende die kleineren sogenannten Interradialcöca (Fig. 39 R), die jedoch fehlen können (Porcellanasteridae, Luidiidae) und nicht immer in 5 interradialen eventuell verzweigten Stämmen vorhanden sind (wie bei Culcita, Cribrella usw.), sondern überhaupt sehr variabele Gebilde darstellen, z. B. bei Asterias, Astropecten, Crossaster, Hippasteria, Brisinga und vielen Notomyota durch zwei vom Rektum ausgehende Büschel repräsentiert werden. Das Rektum und der den Porcellanasteriden, Luidiiden, einigen Astropectiniden und anderen fehlende After sind relativ klein, die unverdaulichen Nahrungsreste werden durch den Mund entfernt. Histologisch finden wir in der Wand des Verdauungsrohres außen das wimpernde Cölomepithel, darunter eine dünne, lakunenführende Bindegewebslage und innen das überall bewimperte Darmepithel, das eine Basalmembran aufweist und eine darunterliegende Nervenschicht, die durch zahlreiche Stränge vom oralen Nervenring gespeist wird. Das Darmepithel enthält zahlreiche, 1 bis 3 Wimpern tragende Schleim- und große, im Magen häufige Körnerzellen, welch letztere in den radiären und interradiären Blindsäcken fast oder ganz alle übrigen Epithelelemente verdrängen. Während die keine Nahrung aufnehmenden Blinddärme der Muskulatur ganz oder fast ganz entbehren, ist der Magen, der über die Beutetiere ausgestülpt werden kann (Muscheln: Austern; Seeigel, Taschenkrebse usw.), mit kräftiger Muskulatur versehen. Auch der Oesophagus besitzt eine innere Längs- und eine äußere Ringmuscularis, von denen die erstere mit radialen Zügen des Peristoms, die letzteren mit dem Sphincter der Mundmembran zusammenhängen. Ueber die Retraktormuskeln s. S. 441.

Geschlechtsorgane. In Begleitung des aboralen Sinus verläuft an der Dorsalseite, eingehüllt von der aboralen Lakune, der Genitalstrang und treibt interradial an den Armwinkeln jederseits eine große, mehr oder weniger verästelte Gonade (Fig. 39) mit weitem Hohlraum. Von

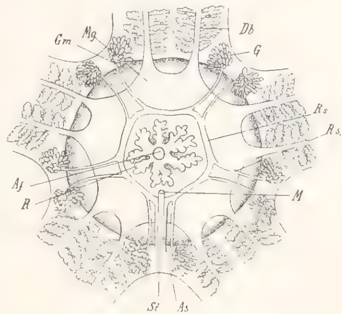


Fig. 39. Genitalsystem und zentrale Teile des Verdauungssystems eines Seesterns, schematisch. Rs aboraler Sinus, Lakunen- und Genitalstrang und davon ausgehenden (Rs_1) Gonaden G, Gm Geschlechtsöffnung, As Axialsinus, St Steinkanal, M Madreporus, Mg Magen mit 10 radiären Blindsäcken Db und den „Interradialcoeca“ R (Rektalcoeca), Af After. Nach Lang aus Claus-Grobben.

jedem dieser außen ventral von den Radialcöca liegenden Büschel bildet sich ein Ausführungsgang, der bei Asterina gibbosa und pancerii (die die Eier in Waben an Steine ansetzen!) auf der Ventralseite, gewöhnlich aber an der Grenze von dorsaler und marginaler Zone links oder rechts in den Armwinkeln in einer Skelettlücke ausmündet. Bei Asterias glacialis teilt sich der Kanal am Ende in 3 bis 9 Röhrchen, die sich auf einzelnen Papillen öffnen. Auch bei anderen Asteriasarten und bei Crossaster papposus finden sich mehrere Poren. Bei einigen Formen trifft man mehrere Büschel von Geschlechtsorganen an jeder Armseite, sie haben besondere dorsale Ausführungsgänge und sind durch einen in die Arme führenden Zug des Genitalstranges verbunden (Luidia, Astropecten, Archaster, Chaetaster, Pentaceros, Culcita, Linckia, Brisinga, Labidiaster, Echinaster purpureus).

Histologisch finden wir von außen nach innen fortschreitend das Cölomepithel mit Wimpern, eine äußere, eventuell Kalkkörper führende Bindegewebslage mit Ringmuscularis an ihrer Innengrenze, ein großes Schizocöl (oder Sinus??), weiter eine innere Bindegewebslage und schließlich das innere Keimepithel. Bei weiblichen Tieren sind die größeren Eier von einem Follikel umgeben, der die akzessorische Eihülle bildet.

Die Tiere sind getrenntgeschlechtlich, äußerlich aber nur selten (Pentaceros turritus) oder nur während der Geschlechtsperiode in der Farbe verschieden. Die Hoden sind weißlich, die Ovarien weißlich, rötlich oder bräunlich gefärbt. Asterina gibbosa ist ein proterandrischer

Zwitter, die jungen Tiere sind Männchen und verwandeln sich erst später in Weibchen.

Die Eier werden im allgemeinen ins Meerwasser abgesetzt und dort von den Spermatozoen der in der Nähe weilenden Männchen befruchtet. Brutpflege kommt ziemlich häufig vor. Die Eier können sich zwischen den Paxillen (Leptotychaster kerguelenensis) entwickeln und die Jungen nachher noch eine Zeitlang mit der Mutter befestigt bleiben, oder man trifft die Jungen erst in Aussackungen des Magens (Stichaster nutrix), nachher außen am Munde, an welch letzterem Orte man überhaupt bei zahlreichen Arten Eier und Junge gefunden hat (Cribrella sanguinolenta, Asterias mülleri, antarctica, perrieri und 2 andere Arten, Diplasterias steineni und lütkeni, Anasterias studeri, chirophora und belgicae). Bei Cyrethra verrucosa wird ein Brutraum durch Hochbiegen der Rückenseite gebildet und bei einigen Pterasteriden finden die Jungen unter der zeltförmigen Supradorsalmembran Zuflucht (Pteraster militaris, Hexaster obscurus, Hymenaster nobilis und praecoquis).

Regeneration, Autotomie, ungeschlechtliche Fortpflanzung. Die Seesterne vermögen abgeschnittene Arme leicht zu regenerieren, die Wunde schließt sich erst, und dann findet von dem ventralen Komplex der wichtigsten Organe (Radiärkanal usw.) die Bildung neuer Zellen (echte Regeneration) und das Hervorwachsen eines erst schmalen neuen Armendes aus dem alten statt, wobei die ersetzten Organe aus den Stummeln der alten hervorsprossen (Asterias rubens u. a.). Auch Teile der Scheibe können regeneriert werden, so ergänzen sich z. B. zerschnittene Asterias rubens zu ganzen Tieren, wenn nur ein Fünftel oder mehr von der Scheibe erhalten war (und die Arme nicht auch abgeschnitten wurden). Asteracanthion tenuispinus scheint sich freiwillig halb durch zu reißen und jede Hälfte sich dann zu ergänzen. Autotomie kommt auch bei einzelnen Armen vor, die auf irgendeine Verletzung oder (Asterias richardi und Solasterias neglecta) auf den Reiz eines schmarotzenden, dem Arm ansitzenden Mycostoma hin abgeworfen oder besser durchgerissen werden können. Autonome Abtrennung von Armen ohne ersichtlichen äußeren Grund findet man bei Linckia (Phataria), Ophidiaster, Brisinga und Labidiaster; dabei wird dann nicht nur der Armstummel regeneriert, sondern auch das abgeworfene Armende läßt an seinem Proximalrand 4 neue kleine Arme hervorsprossen. Er bekommt dadurch erst kometenförmiges Aussehen, durch weiteres ausgleichendes Wachstum wird aber bald die Normalgestalt erreicht. Die auf diese Weise stattfindende, bei Linckia näher bekannte, ungeschlechtliche Vermehrung scheint bei dieser Gattung (L. multiforis, diplax, pacifica, unifascialis, guildingii) ziemlich ausgiebig zu sein. Doch scheint bei den anderen genannten Gattungen die Sache im wesentlichen gleich zu liegen.

b) Systematik. Früher hat man die paläozoischen Formen den rezenten Euasteroidea als Unterklasse. Palaeasteroidea gegenübergestellt. Sie sind durch das Alternieren der Ambulacralia, das freilich in demselben Ambulacrum teilweise schon normaler Oposition der Wirbelstücke weichen kann, charakterisiert. Bei einigen ist das Madreporit ventral.

Es existiert noch keine definitive systematische Anordnung der Seesterne. Wir folgen im wesentlichen den Einteilungen und Diagnosen von Fisher 1911.

Klasse. Asteroidea Burmeister. (im Sinne von Euasteroidea).

I. Provisorische Unterklasse. Phanerozonia Sladen. Marginalplatten deutlich, den Körperrand bildend. Dorsalskelett aus Paxillen oder aus flachen Mosaikplatten bestehend, letztere mit Stacheln, Dornen, dickem Hautüberzug oder nackt. Nur sitzende Pedizellarien und zwar zangenförmige, kammförmige, alveoläre und klappenförmige. Papulae (außer bei einigen Linckiidae und Asteropidae) auf die Zone dorsal von den Marginalia beschränkt. Peristom adambulakral. Amb. nicht gedrängt. Füßchen 2reihig. Außer einigen Luidiaarten normalerweise 5strahlig.

1. Ordnung. Papillopoda Becher. Füßchen ohne typische Saugscheibe, höchstens mit abgesetztem Knopf an der Spitze.

1. Unterordnung. Cribrellosa Fisher. Mit cribriformen Organen und einfachen Ampullen. Ohne After, Enddarm und Interradialcöca. Marginalplatten dünn, lamellenförmig.

Familie. Porcellanasteridae. Hierhin die Porcellanasterinae (mit interradial lokalisierten cribriformen Organen, ohne Fortsetzung der Fasciolenfurchen dieser Organe auf die ventralen Interradialfelder), Porcellanaster, und die Ctenodiscinae (mit vermehrten cribriformen Organen, mit Actinalfasciolen), Ctenodiscus (mit Supraamb.).

2. Unterordnung. Paxillosa Perrier, Fisher em. Doppelte Ampullen. Dorsalplatten immer paxillenförmig. Supraambulakralplatten vorhanden. Zuweilen einfache cribriforme Organe bezw. Wimperfurchen.

1. Familie. Luidiidae. Supramarginalplatten durch Paxillen ersetzt. Ventromarginalplatten breit. Ohne Anus, Enddarm und Enddarmcöca. Papulae zusammengesetzt. Luidia.

Die beiden folgenden schlecht getrennten Familien haben stets (wenn auch zuweilen kleine) Supramarginalia, stets einen Enddarm und nur selten fehlende Enddarmcöca (Blakiaster), einen oft sehr kleinen, zuweilen fehlenden After und einfache Papulae.

2. Familie. Goniopectinidae. Marginalia, Adamb. und Dorsalplatten mit einer Reihe von Dornen besetzt, die durch eine dünne schwimmhautartige Membran verbunden werden und Fasciolen bilden, die den cribriformen Organen entsprechen. Marginalia und Ventrolateralia gewöhnlich mit dünner Membran bedeckt, die letztere in doppelten oder einfachen interradialen Reihen, zwischen denen Fasciolen von den marginalen zu den adambulakralen Wimperfurchen hinüberführen. Die Bewaffnung der Adamb. besteht gewöhnlich aus einer marginalen Dornreihe; Randdornen der Paxillen durch Membranen verbunden.

3. Familie. Astropectinidae. Die marginalen und actinalen Platten nie mit einer einzigen Reihe verbundener Dornen besetzt, ebensowenig findet Verbindung der Paxillendornen statt. Inframarginalia massiv, Supramarginalia verschieden. Marginalia niemals mit glatter Membran

überzogen. Ventrolateralplatten niemals in doppelten, von spezialisierten Fasciolen getrennten Interradialreihen. Paxillenartige Stacheln und Dornengruppen auf den ventrolateralen Platten. Immer mehrere Reihen Adambulakraldornen, die seitlich in die Dornen der Ventrolateralplatten übergehen.

2. Ordnung. Notomyota Ludwig. In der Rückenwand der Arme mit 2 nicht in die Scheibe reichenden Längsmuskelbündeln, die den Ambulakralmuskeln entgegenwirken und wahrscheinlich durch Ermöglichung peitschenartiger Armbewegungen das Tier zum Schwimmen befähigen. Supra- und Inframarginalia mehr oder weniger abwechselnd, mit scharfen Dornen. Radialcöca, Geschlechtsorgane und die einzelnen Kiemen auf die Armbasen (Papularien) beschränkt. Armrückenhaut nachgiebig, mit reduzierten Paxillen oder flachen, körner- oder dornentragenden Platten. Primärskelett des Rückens erkennbar. Wimperrinnen und Superamb. fehlen. Ventrolateralfelder klein und auf die Scheibe beschränkt. Meist 2 (bis 5) Interradialcöca, 4 (bis 5) Polische Blasen. Arme relativ lang. Füßchen mit schwachen Saugscheiben. Unverkalkte Interradialsepten.

1. Familie. Benthopectinidae. Nach Fischer alle Formen umfassend. Von Ludwig auf die Formen mit unpaarem oberem und unterem Marginale beschränkt, die in der Regel Pedicellarien und zwar kammförmige haben. Benthopecten usw.

2. Famiile. Cheirasteridae. Ohne unpaare Randplatte, meist mit Pedicellarien und zwar zweiklappigen, büschel- oder kammförmigen. Pontaster usw

3. Ordnung. Valvata Perrier. Füßchen mit Saugscheiben. Dorsalplatten paxillen- bis flachmosaikförmig. Pedicellarien alveolär und klappenförmig. Ohne die Rückenmuskeln usw. der Notomyota. Marginalia opponiert. Zeigen Uebergänge zu den spinulosen Cryptozoniern.

1. Familie. Odontasteridae Verrill. Mit einem (oder 2) umgebogenen, mehr oder weniger glasigen Zahn auf jedem Mundeckplattenpaar. Mit unpaaren oberen und unteren Marginalia. Die Marginalia wohlentwickelt. Keine Superambulacralia. Dorsalplatten mehr oder weniger paxillenförmig. Ventrolateralplatten in mehreren Reihen. Die kleinen Adamb. breiter als lang, mit geradem Furchenrand und mehreren Stachelreihen. Kiemen nicht auf Armbasen beschränkt. Odontaster usw.

2. Familie. Chaetasteridae. Mit unpaarigen oberen und unteren Marginalia. Die Dornen der reihenweise geordneten, paxillenförmigen Platten zart und glasig. Die dorsalen Platten des Arms und die radialen der Scheibe an den der Armrichtung parallelen Seiten mit je 2 Connektivplättchen. Ampullen einfach. Interbrachialsepta verkalkt. Interradiale Ventralzonen klein. Marginalia und Ventrolateralplatten auch paxillenförmig. Keine Pedizellarien, Papulae einfach, nur auf den Armrücken. Chaetaster.

3. Familie. Archasteridae. Keine unpaaren Marginalia. Jene Dornen nicht zart und glasig. Ampullen doppelt. Primärplatten und sekundäre Radialia dorsal wohl erkennbar. Auch die seitlichen paxillenförmigen Platten in schiefen Querreihen geordnet, mit besonderem, innerem, imbricierendem Kiel an der Radialseite. Dorsoventralplatten rudimentär oder nur zu wenigen Interbrachialsepten verkalkt. Astropectenähnlich, aber mit großen Füßchensaugscheiben und ohne Superambulakralplatten. Die Geschlechtsorgane dehnen sich weit in die Arme aus. Archaster.

4. Familie. Goniasteridae. Massive dicke Randplatten, keine unpaaren Stücke. Deutliches dorsales Primärskelett, dorsale und ventrale Intermediärplatten (die große Felder einnehmen) tesselat. Die Dorsalplatten polygonal, ohne Kiel zum Imbricieren, rund oder sternförmig, manchmal durch innere radial geordnete Plättchen verbunden oder ein geschlossenes Maschenwerk mit zahlreichen sekundären Zwischenplatten bildend. Die Platten können ein paxillenförmiges Tabulum, einen vergrößerten Stachel oder Granulationen tragen oder nackt sein. Sie können unter einer dicken glatten, granulierten oder Pedizellarien führenden Haut verborgen sein. Pedizellarien alveolär, zweiklappig oder foraminat. Superambulakralplatten vorhanden oder fehlend. Papulae gewöhnlich auf die Radialzonen beschränkt. Scheibe groß, Interbrachialsepten meist weich, Gonaden „interradial". Ampullen doppelt (immer?). Große Familie mit 8 Unterfamilien und 41 Gattungen. Mimaster, Pseudarchaster, Nectria, Pentagonaster, Goniaster, Hippasteria, Leptogonaster, Chitonaster, Anthenea.

5. Familie. Oreasteridae. Marginalia groß, aber in der Regel durch granuläre Haut und Kiemen verborgen. Dorsalskelett stern-netzartig, seine Platten oft mit großen konischen Höckern oder Stacheln. Die Platten immer gekörnt. Scheibe sehr hoch und groß, mit breiten Interradialzonen, Papulae nicht ventral, sondern in bestimmten Papularien. Interbrachialsepta gewöhnlich verkalkt. Oreaster.

6. Familie. Asteropidae. Marginalia klein, mehr oder weniger imbricierend. Der ganze Körper von glatter dicker Haut überzogen. Dorsalskelett netzförmig bis mosaikartig. Die Platten schwach imbricierend, größere vorragende Stacheln nur ausnahmsweise, kleinere Dörnchen öfters vorhanden. Scheibe ziemlich groß mit geräumigen Interradialfeldern. Papulae meist in Papularien, zuweilen bis zwischen die Randplatten. Pedicellarien, wenn vorhanden, zweiklappig oder zangenförmig. Dermasterias, Asterope, Marginaster usw.

7. Familie. Linckiidae. Scheibe klein, mit meist sehr schmalen oder etwas breiteren und dann Papulae tragenden ventralen Interradialzonen. Randplatten klein. Skelett tesselat, oberflächliches Skelett körnig (bei Leiaster eine glatte Haut ohne vorspringende Dornen über dem Skelett). Pedizellarien, wenn vorhanden, alveolär (salzfassförmig usw: excavat und foraminat). Linckia, Bunaster, Hacelia, Ophidiaster.

II. Provisorische Unterklasse. Cryptozonia Sladen. Marginalplatten gewöhnlich unauffällig. Papulae meist auch intramarginal und ventral. Dorsalskelett nie echt paxillös, auch nicht tesselat, sondern netz-dachziegelartig. Auf der Dorsalseite immer irgendeine Form der Bestachelung. Füßchen mit deutlicher Saugscheibe.

4. Ordnung. Spinulosa Perrier. Peristom adambulakral. Pedicellarien selten, nie gestielt

oder alveolär. Amb. nicht gedrängt. Actinalskelett aus dünnen übergreifenden Platten oder ein mehr oder weniger regelmäßiges Netzwerk bildend (oft kreuzförmig mit oder ohne Verbindungsplättchen). Füßchen meist biserial.

1. Familie. Ganeriidae. Mundplatten klein, nicht spaten- oder pflugscharähnlich. Ambulakralfurche eng. Marginalplatten groß. Dorsalskelett dachziegel- oder netzartig. Ventrolateralplatten in deutlichen Querreihen, mit 1 oder 2 großen Stacheln oder kleinen Körnergruppen. Ganeria usw.

2. Familie. Asterinidae. Mundeckplatten klein, Randplatten unauffällig. Dorsalskelett gut entwickelt, nicht ganz rudimentär, aus dichten imbricierenden Platten, die kleine Stacheln tragen. Ventrolateralplatten gleichfalls imbricierend, mit Büscheln oder Fächern von Dornen. Asterina, Anseropoda, Tremaster.

3. Familie. Echinasteridae. Mundeck- und Randplatten klein bezw. unauffällig. Dorsalskelett mit kleinen imbricierenden Platten, unregelmäßig netzförmig, mit einzelnen Dornen, Dornengruppen oder größeren Stacheln. Keine Pedizellarien. Interradialsepta mehr oder weniger rudimentär und schwach. Ampullen einfach. Füßchen biserial, ohne Kalkrosette in den Endscheibchen. Cribraster, Echinaster usw.

4. Familie. Mithrodiidae. Mundeckplatten klein, Randplatten unauffällig. Das Skelettnetzwerk aus 3strahligen, in Sechsecken angeordneten Elementen; der ganze Körper mit Einschluß der größeren Stacheln mit einem Ueberzug von Körnern, Schüppchen oder Dörnchen. Ohne Interbrachialsepta. Scheibe sehr klein. Ampullen doppelt. Keine Pedizellarien. Mithrodia.

5. Familie. Acanthasteridae. Mundeckplatten klein, Randplatten unauffällig. Skelett offen, netzförmig mit großen isolierten Stacheln, die von körniger Haut überzogen werden. Ampullen doppelt. Scheibe groß, mit ansehnlichen Interradialzonen. Pedizellarien mit aufgerichteten hohen Zangen auf einer besonderen Platte. Zahlreiche Arme und zahlreiche Madreporenplatten. Keine Kalkrosetten in den Füßchenendscheiben. Mit Interbrachialsepten. Acanthaster.

6. Familie. Valvasteridae. Mundeckplatten klein, Randplatten deutlicher. Dorsalskelett regelmäßig geordnet, mit dreieckigen Maschen für die Kiemen, die Platten mit kleinen isolierten Stacheln, die Ventrolateralplatten mit einem oder mehreren großen flachen Dornen. Ampullen doppelt. Auf den Supramarginalia große niedrige, zweiklappige, auf den Dorsal- und Adambulakralplatten einige wenige, sehr kleine zweizangige Pedicellarien. Füßchensaugscheibe mit Kalkrosette. 5 Arme, ein Madreporit. Mit Interbrachialsepten. Valvaster.

7. Familie. Cryasteridae. Mundplatten klein. Das ganze dorsale und seitliche Skelett abortiert, so daß nur die Amb. und Adamb. erhalten sind. Die Haut mit kleinen, von Membranen eingehüllten Stacheln. Cryaster, Magdalenaster.

Die folgenden Familien der Spinulosa haben große spaten-pflugscharförmige Mundeckplatten, mit deutlichen Furchen- und meist auch Subambulakralstacheln. Die Bewaffnung der Adamb. ist kammförmig. Die Ambulakralfurchen sind weit.

8. Familie. Solasteridae. Eine oder beide Marginalplattenreihen paxillenförmig. Die Dorsalpaxillen nie mit langen, durch Haut verbundenen Dornen, sondern bündelartig oder penicillat. Ventrolateralplatten vorhanden. Interbrachialsepta vorhanden. Die zwei Reihen adamb. Dornen stehen rechtwinklig zueinander. Mundplatten spatelförmig. Keine Pedizellarien, Anus vorhanden. Dorsalskelett meist netzförmig oder kleine selbständige Plättchen. Füßchen in 2 Reihen. Solaster, Laetmaster, Lophaster usw.

Die folgenden Familien haben pflugscharförmige Mundeckplatten, keine (deutlichen) Ventrolateralplatten. Die Stacheln der Dorsalseite sind mehr oder weniger durch eine Membran verbunden. Marginalia verborgen und nicht paxillenförmig.

9. Familie. Korethrasteridae. Ohne Supradorsalmembran, Segmentalporen und Papillen. Interbrachialsepta teilweise verkalkt. Adambulakral- und Inframarginalarmatur bilden eine niemals häutig verbundene Reihe. Dorsalplatten rundlich oder ein weitmaschiges Netz bildend. Dornenbüschel mit oder ohne verbindender Membran. Inframarginalia nie paxillenförmig. Solasterähnlich. Korethraster, Peribolaster.

10. Familie. Myxasteridae. Ohne Supradorsalmembran, Segmentalporen und Papillen. Interbrachialsepten verkümmert, aber zuweilen verkalkt. Adamb.-Dornen zart, häutig verbunden, nicht mit den inframarginalen eingereiht. Dorsal- und Lateralplatten sehr zart, in Haut gebettet, mit Gruppen kürzerer oder längerer, häutig verbundener oder in einen Sack eingeschlossener Dornen. Pythonaster, Myxaster, Asthenactis.

11. Familie. Pterasteridae. Die Dorsalplatten sind kreuzförmig oder gelappt und tragen Dornengruppen, deren Haut in Verbindung getreten ist und eine große Supradorsalmembran bildet, die in der Mitte ein Osculum mit Klappe und außen von den Adamb. eine Reihe segmentaler, von bestimmten Dornen oder Papillen beschützter Oeffnungen aufweist. Adambulakrale Stacheln können eine actinale Membran tragen oder in die ventrale Wand aufgenommen sein. Mundplatten pflugscharförmig, Ventrolateralplatten fehlen. Interbrachialsepta häutig. Der Raum unter der Supradorsalmembran wird oft als Brutraum benutzt. Pteraster, Marsipaster, Hymenaster usw.

5. Ordnung. Forcipulata Perrier. Mit gestielten Pedicellarien, die allein auftreten oder sich um die oft einzeln stehenden großen langen Stacheln gruppieren. Peristom ambulakral (außer bei Brisingidae) mit kleinen Mundeckstücken. Amb. meist sehr gedrängt und daher 4reihige Füßchenanordnung. Die Skelettplatten pflegen quere Bögen zu bilden, mit oder ohne Verbindungsplättchen, so daß rechteckige oder unregelmäßige Maschen entstehen. Die Bögen zeigen die Tendenz, eine gewisse Konkordanz unter sich in den ventralen und dorsalen Regionen und zu den Adamb., von denen 2 oder 3 auf einen Bogen zu kommen pflegen.

1. Familie. Zoroasteridae. Dorsalskelett mit relativ wenigen zusammenstoßenden Platten in regelmäßigen Längs- und Querreihen. Primärstücke deutlich, manchmal nur im Zentrum. Adamb. ungleich, abwechselnd gekielt. Füßchen an der Basis der rundlichen Arme 4-, gegen

die schmale Spitze zu 2reihig. Füßchenampullen (immer?) zweiteilig. Papulae isoliert, in Längsreihen. Gestielte gerade Pedicellarien unabhängig vom tieferen Skelett. Zoraster, Cnemidaster, Pholidaster, Prognaster

2. Familie. Stichasteridae. Ambulakren ganz 4reihig. Adamb. gleich, zusammengedrückt, mit 2 bis 4 Furchenstacheln. Dorsalplatten groß. Dorsolateralplatten in Längsreihen, wie die Supramarginalia granuliert, gekreuzte Pedizellarien. Stichaster, Tarsaster usw

3. Familie. Heliasteridae. Rückenskelett netzförmig, die Platten mit einzelnen oder mehreren Stacheln (nie Paxillen). Doppelte Interbrachialsepten. Eine Reihe Adamb.-Stacheln. Füßchen 4reihig. Scheibe groß, mit zahlreichen (über 25) Armen (und vermehrten Madreporiten).

4. Familie. Pedicellasteridae. Dorsalskelett kleinplattig, netzförmig. In den Armen die Platten deutlich in Quer- und Längsreihen mit viereckigen Maschen. Adamb. kurz, jedes mit einem Furchenstachel. Füßchen 2reihig. Gekreuzte, oft auch gerade Pedicellarien (in der Umgebung vorstehender dorsaler Stacheln). Scheibe klein, Arme zylindrisch, oft vermehrt. Pedicellaster, Coronaster usw.

5. Familie. Asteriidae. Scheibe klein, Arme lang. Dorsalskelett netzförmig, mit verschieden großen Platten (Stacheln oder Stachelgruppen). Oft Armvermehrung. Adamb. mit 1 bis 3 Stacheln in Reihen längs dem Furchenrand. Füßchen 4reihig. Gerade und gekreuzte Pedizellarien. Asterias, Hydrasterias usw

6. Familie. Brisingidae. Scheibe klein, mit sehr zahlreichen, an der Basis getrennt voneinander entspringenden Armen. Daher keine Interbrachialsepten. Füßchen 2reihig. Dorsalskelett rudimentär, nur auf der Scheibe. Randplatten rückgebildet. Die kleinen Stacheln in Hautsäcken, die mit gekreuzten Pedizellarien besetzt sind. Gekreuzte und zuweilen auch gerade Pedizellarien vorhanden. Brisinga, Odinia, Labidiaster usw.

4. Ophiuroidea. Schlangensterne.

a) Allgemeines. Die Ophiuroiden sind frei bewegliche Echinodermen, deren Mund unter natürlichen Verhältnissen dem Boden zugewendet ist (Eleutherozoen). Der Körper ist meist dorsoventral abgeflacht (hoch bei Ophiopyrgus und Ophiotholia) und wie derjenige der naheverwandten Asteroiden mit 5 Armen versehen, die hier selten vermehrt, häufig jedoch verzweigt sein können. Sie sind rundlich und bis zur Basis relativ dünn, der afterlose sackförmige Darm entsendet keine Cöca in dieselben. Bei den Schlangensternen besorgen die Arme durch ihre Gesamtbewegung die Lokomotion, der die der Saugscheibe und der Ampulle entbehrenden Füßchen nur in beschränktem Maße dienen können. Die Ambulakralfurche ist geschlossen, durch einen Epineuralkanal ersetzt, und außer bei Ophiotheresis und den Lysophiuren mit einer Reihe unpaarer Ventralplatten bedeckt. Dabei sind die eigentlichen Ambulakralplattenpaare mit in die Tiefe gerückt und zu „Wirbeln" verschmolzen, die das Zentrum der Arme einnehmen und deren Leibeshöhle bis auf einen engen dorsalen Spalt verdrängen. Die Dorsalseite der Arme wird von einer Reihe sekundärer Radialia, den „Dorsalschildern", eingenommen, an die sich jederseits eine Reihe von Adambulacralia, die Lateralschilder, anschließen, in deren Grenze gegen die Ventralschilder die Füßchen durchtreten. In der Zahl entsprechen die einzelnen Glieder bezw. Paare all dieser Plattenreihen den Wirbeln Zur Mundbewaffnung werden mindestens (vielleicht mehr) je 2 Paare von Wirbeln und Seitenplatten umgebildet. Die Scheibe, in deren später undeutlichem Primärskelett nicht die ersten interradialen Stücke, sondern die ersten Radialplatten in der Anlage auf die vom Endtentakel durchbohrten Terminalia folgen und sich dem Zentrale anlegen, verbreitert sich nachträglich zwischen die Arme, die so am Scheibenrand weit getrennt erscheinen und „unvermittelt" in die

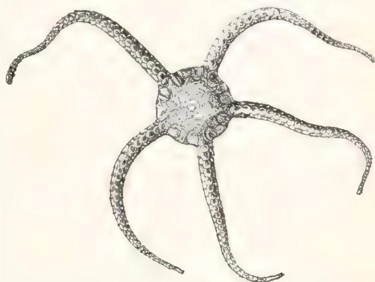


Fig. 40. Ophiura (Ophioglypha) bullata, Apikalseite. Aus Hertwig. Nach W. Thomson.

Scheibe übergehen, sich an der Ventralseite aber mit ihrem Scheibenteil bis nahe zum Mund fortsetzen. Bei dem Wachstum der Scheibe dehnen sich ursprünglich dorsale Teile derselben in den Interradielzonen bis weit auf die Oralseite aus. Dadurch werden zunächst 5 dorsal angelegte interradiale Platten, von denen eine den meist einfachen Madreporus trägt, in die ventralen Mundwinkel verlagert, wo sie als „Mundschilder" den Eindruck von Oralia machen. Da der Ringkanal ziemlich hoch liegt, so wird der Verlauf des mit dem Axialsinus durch weite Oeffnung kommunizierenden Steinkanals zur Madreporenplatte ein absteigender, was weitere eigenartige Lagerungsverhältnisse zum Axialkomplex zur Folge hat. Der geschlossene aborale Sinus mit seiner Begleitung von Genitalstrang, Lakune und einem aboralen Nervenstrang wird damit gleichfalls in interradialen Winkeln auf die

Ventralseite herübergezogen, so daß auch die 10 Komplexe von interradialen Geschlechtsorganen ventral liegen. Sie entleeren ihre Produkte in 10 adradiale, der Atmung dienende Ektodermeinstülpungen, die Bursae, deren (im Gegensatz zur Körperwandbekleidung wohlerhaltenes) zum Teil wimperndes Epithel durch die schmalen ventralen wimpernden Oeffnungen zu Seiten der basalen Armteile einen Wasserstrom in die Taschen hineinführt. Die Bursalspalten stellen also gleichzeitig Geschlechts- und Atemöffnungen dar. Ein innerer Oralsinus ist nicht ausgebildet und die radiären Hyponeuralkanäle sind nicht so deutlich geschieden wie bei Asteriden. Echte Pedizellarien fehlen.

Körperwand. Die Epidermis ist, abgesehen von einigen Stellen (Bursae, Füßchen, Endtentakel), zu einem äußerst dünnen, unbewimperten Ueberzug der Lederhaut geworden, der der Nerven und Drüsenzellen entbehrt und oft noch abgescheuert ist. Die Cutis enthält hier das Hautpigment. Eine Spaltung derselben durch ein Hautschizocöl ist nicht vorhanden. Dringen wir tiefer bis zur Leibeshöhle, so treffen wir auf deren bewimpertes Epithel, eine Muskelschicht ist nicht ausgebildet. Bei Ophiomyxa besitzt die ganze Haut mehrzellige Giftdrüsen (Reichensperger).

Leuchtvermögen. Einige Ophiuriden (Ophiopsila annulosa, aranea, Ophiacantha bidentata, Ophioscolex glacialis, Amphiura filiformis, squammata) zeigen (auf Reizung verschiedener Art) deutliches Leuchten. Das Leuchten tritt meist an den Seitenschildern, an den Ventralschildern und den Stacheln und ihren Basalplatten auf. Es scheint intrazellulär und an gewisse Drüsen gebunden zu sein.

Skelett. Das Dorsalskelett des fertigen Tieres besteht auf der Scheibe aus mehr oder weniger großen Platten oder Schuppen, unter denen sich oft 2 adradiale Stücke am Armursprung durch besondere Größe auszeichnen: die paarigen Radialia (besser „Adradialia"). Diese werden entwickelungsgeschichtlich aber spät angelegt, viel später als die primären Platten, von denen die anfangs an der Ventralseite gefurchten, später zur Rohre geschlossenen Terminalia vorangehen, gefolgt von einem Zentrale und von 5 ihm anliegenden primären Radialia (Ophiolepididen, Amphiuriden und Asteronyx juv.). Dieser Zustand scheint bei der Tiefseeophiuride Ophiotypa simplex mit leichter Modifikation festgehalten (wenn es sich nicht um eine Jugendform in der genannten Art handelt). Dann legen sich am dorsalen Scheibenrande die später bald ventralwärts wandernden 5 bei Lapworthuridae, Eoluididae und einigen Euryalae (s. „Systematik" S. 456) fehlenden Mundschilder (Oralia) an, von denen eins den (von der Dorsalseite gesehen etwas entgegen dem Sinne des Uhrzeigers verschobenen) Madreporus enthält (Fig. 41, 1). Zwischen diesen Mundschildern und den primären Radialia fügen sich 5 neue Interradialia ein, die von 5 adradialen Plattenpaaren, den späteren paarigen Adradialia zu einem Kranz von Platten ergänzt werden, der die 5 Radialia umgibt. Ungefähr dieses Stadium des Dorsalskeletts scheint bei Ophiomastus secundus, Ophioglypha convexa, Ophiopyrgus saccharatus und Ophiophthirius actinometrae dauernd (wenn es sich nicht um Jugendstadien bei den genannten Tieren handelt) beibehalten zu werden. Die weitere Umbildung des Scheibenrückenskeletts beruht nun darauf, daß sich zwischen den äußeren und den inneren Plattenring (der Radialia) neue Platten einschieben, zunächst gewöhnlich 5 Interradialia (wodurch ein bei vielen jungen Ophiolepididen: Ophioglypha solida, Ophiomastus tegulitius, Ophiomastus tumidus, Ophiopyrgus wyville-thomsoni, Ophiopyrgus alcocki, Ophiomusium lymani und pulchellum festgehaltenes Stadium gegeben ist), dann 5 radiale Keilplatten, wodurch Aehnlichkeit mit einigen Ophiolepididae (Ophioglypha scutata, Ophioceramis clausa, Ophiomusium lunare und ferrugineum) und Amphiuridae (Polypholis echinata, Hemipholis wallichii und cordifera) entsteht. Auf diesem Stadium sind auch (zuweilen früher: Amphiura squammata, oder später) 5 zwischen die primären Radialia und das Zentrale eingeschobene Interradialia angelegt worden, also diejenigen Platten, die man früher auf Grund verfrühter Homologisierungen als Basalia bezeichnete, die aber nach der Zeit ihrer Anlage kaum mit den frühen primären Interradialia der Seesterne usw. verglichen werden können. Bei der weiteren Vermehrung der Platten, wie sie bei vielen Arten stattfindet, können noch sehr zahlreiche Platten außen, zwischen und innen von den 5 primären Radialia zur Ausbildung kommen; unter letzteren auch solche, für die einige Forscher den Namen „Infrabasalia" nicht zu gewagt fanden (Fig. 41, 1 u. 2). — Auf der Mundseite schieben sich erst je 4 Platten zwischen die Mundschilder und die Interradialia des Scheibenrandes, von diesen 4 werden die beiden äußeren adradialen Platten zu den Bursalschuppen. — Bei Ophiopyrgus ist die Scheibe kegelförmig erhoben und gleicht mit ihrem Zentrale, ihren „Basalia" und Radialia einem umgekehrten Crinoidenkelch, bei Ophiura minuta sind auch das Centrale, 5 „Basalia" und 5 Radialia deutlich, bei Pectinura, Ophiura inornata und convexa, Ophiocrene dominieren das Zentrale und die Radialia, bei Ophiometra exigua und Ophioceramis obstricta fehlen dagegen die Radialia bezw. sie treten zurück hinter anderen Platten usw. Die dorsalen Platten können zu kleinen im Bindegewebe verborgenen Schüppchen oder Körnern werden (Ophomyxa und die meisten Streptophiuren und Cladophiuren), wobei dann wieder eine hohe Epidermis auftreten kann (Ophiomyxa). Die paarigen Radialschilder bleiben gewöhnlich länger deutlich, doch können auch diese fehlen (Neoplax). An der adradialen Seite der Bursae liegt im Scheibenskelett eine einheitliche längliche Platte, die Bursalspange, ihr gegenüber an dem anderen Rande findet sich ein Stück oder eine Reihe von Plättchen, die Bursalschuppen. Auch die Wand der Bursae selbst kann größere oder kleinere Schuppen oder Plättchen enthalten, die sogar Stacheln tragen können.

Das Armskelett besteht normalerweise aus 6 Stücken in jedem Segment, den zentralen, zu einem Wirbel verschmolzenen Amb. und den darumliegenden paarigen Seitenschildern, dem Ventral- und dem Dorsalschild. Von den äußeren Platten werden die Seitenschilder zuerst angelegt

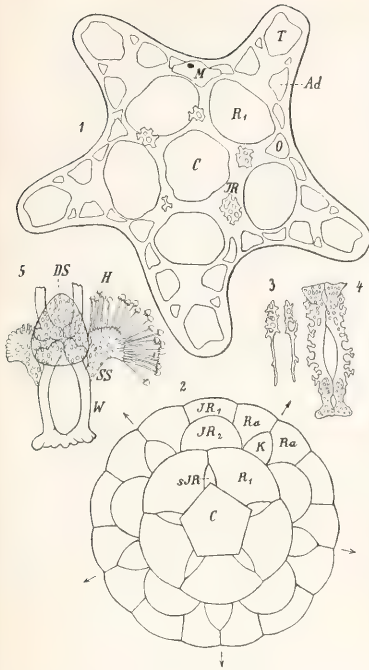


Fig. 41. Entwickelung von Apikalskelett und Armwirbeln bei Ophiuren. 1. Apikalskelett einer jungen Amphiura squammata 112:1. 2. Apikalskelett einer jungen Ophiactis asperula (Philippi) 36:1. C Zentrale, R_1 primäre Radialia, JR Interradialia, JR_1, JR_2 erstes bezw. zweites Interradiale, sJR sekundäres Interradiale, K Keilplatte, Ra Radialschilder (Adradialschilder), T Terminalia, O Oralschild (Mundschild), M Madreporenplatte, Ad Adambulacralia (Seitenplatten), 3. und 4. ganz junge und etwas ältere Wirbelanlage von Amphiura squammata, die selbständige Anlage der beiden Hälften (Ambulacralia) zeigend, 176:1. 5. Armplatten von Ophiohelus umbrella Lym. W Wirbel, an embryonale Verhältnisse erinnernd. DS Dorsalschild, SS Seitenschilder mit Hakenstacheln H. 1 bis 4 nach Ludwig, 5 nach Lyman.

und nehmen dann fast den ganzen Armumfang ein, wie sie denn auch bei dem fertigen Arm nach der Spitze zu, wo die neuen Armglieder sich hinter dem Terminale einschieben, relativ breiter sind. Die Ventralplatten und die noch etwas später angelegten dorsalen Armplatten können fehlen, erstere bei Ophioteresis Astrogomphus, in den fossilen Gruppen der Lysophiuren, der Ophiurinidae und Lapworthuridae, und sind sehr klein am Armende vieler Cladophiuren, letztere bei den Euluidiidae, Ophioscolex, Ophiosciasma, Ophiocampsis, Ophiobracchion, Asteronyx (?), Ophiogeron, Ophiomyxa part., Neoplax, Ophiobyrsa und Microphiura decipiens. Die Dorsalplatten können auch durch 2 (Ophioteresis und Ophiuropsis u. a.) oder mehrere Platten oder ein Mosaik kleiner Stückchen ersetzt (Mehrzahl der Cladophiuren) oder von sekundären Platten umgeben sein (Ophiopholis). Die Seitenplatten sind am konstantesten. Sie entsprechen den Adambulacralia des Seesternarmes (vgl. z. B. Ophioteresis). Die Füßchen treten durch Poren hindurch, die zwischen den Seiten- und Ventralschildern liegen, die je eine Ausbuchtung dafür bilden. Während die Ventralschilder (oder „Epineuralia") stets der Stacheln entbehren, finden sich dieselben vorzugsweise auf den Adambulakralplatten und bilden dort gewöhnlich eine ungefähr vertikale Reihe.

Die Wirbel werden in zwei Stücken angelegt, die gewöhnlich nachträglich verschmelzen. Bei den Lysophiuren (Palaeophiura) alternieren die Ambulacralia wie bei paläozoischen Seesternen. Bei einigen Tiefseeophiuriden (Ophiohelus und Ophiogeron, Microphiura decipiens) stellen sie unverschmolzene, in Längsrichtung des Armes gelegte Stäbchen dar (ähnlich die ontogenetische Anlage) (Fig. 41, 3 bis 5).

Die Wirbel sind kurzzylindrische Stücke, die sich mit ihren ebenen Flächen aneinandersetzen. Dorsal und ventral tragen sie eine Längsfurche, erstere für den Leibeshöhlenkanal der Arme, letztere (die sich bei Ophiarachna incrassata im ersten normalen (nicht mehr peristomalen), bei Ophiocoma erinaceus bei mehreren Wirbeln über dem Radialkanal schließt) für das radiale Wassergefäß und die Begleitorgane. Die Wirbel artikulieren mit ihren vorspringenden zentralen Partien, die bei den Streptophiuren kopf- bezw. pfannenförmig sind und Bewegung in beliebiger Richtung gestatten. Bei den Cladophiuren hat das distale Wirbelende eine Gelenkfläche von der Gestalt einer horizontal liegenden Sanduhr, das proximale die Form einer senkrecht stehenden Sanduhr, wodurch ein typisches Sattelgelenk entsteht, das dem Arm gleichfalls Krümmungen in jeder Richtung gestattet. Dagegen ist bei den Zygophiuren die Bewegung mehr auf die Horizontalebene beschränkt. Wir haben hier an der adoralen Wirbelfläche zwei laterale untere und einen (aus zweien verschmolzenen) oberen Gelenkhöcker, dazu 2 laterale obere und eine untere unpaare Gelenkgrube, denen an der anderen Wirbelseite dann ebenso viele Pfannen bezw. Höcker entsprechen. Der oralen Fläche des ersten nicht peristomalen Wirbels fehlen der unpaare Höcker und Grube, die seitlichen Gelenkflächen, jederseits 2, sind auf Fortsätze verlegt. Der zentrale Gelenkteil der Wirbel ist von einer Art Bindegewebsgelenkkapsel umschlossen. Die zurücktretenden großen Randflächen der Wirbel werden von den Ansätzen der Muskeln eingenommen, die, 4 an der Zahl, oben und unten, links und rechts von einem Wirbel zum anderen auf kürzestem Wege hinüberziehen und durch verschiedene Kombinierung ihrer Arbeit Biegung nach oben, unten, links und rechts bewirken können. An seiner Ventralseite besitzt jeder Wirbel rechts

und links eine Grube für das obere blinde Ende seiner Füßchen und von dieser Grube führt ein gebogener Kanal für den Zuleitungskanal durch den Wirbelkörper und mündet (nachdem er an der aboralen Seite nochmals aus- und wieder eingetreten sein kann) links und rechts in der Ventralfurche. Proximal von diesen beiden Poren der Ventralfurche finden sich noch zwei feine Löcher, durch die jederseits ein Nerv für die Intervertebralmuskeln läuft, um auf der Proximalseite des Wirbels an der Gelenkkapsel und neben dem unteren, lateralen Gelenkhöcker wieder auszutreten.

Mundskelett (Fig. 42). Das definitive Mundskelett entsteht im wesentlichen aus 2 Paaren von Wirbeln und Adambulacralia (Seitenschilder). Die Seitenschilder der hinteren Paare treffen sich in den Interradien und bilden vor dem unpaaren Mundschild die sogenannten Seitenmundschilder. Weiter peripherwärts können sich noch 2 distalere Seitenschilder in jedem IR. treffen (Trichaster palmiferus). Die Seitenplatten des vorderen Segmentes sind den Interradien zu konvex gekrümmt und stoßen weiter oralwärts ebenfalls in den Interradien zusammen, in denen sie wie die Spitzen eines adambulakralen Seesternperistoms sehr weit mundwärts ragen. Mit ihrem distalen Ende aber verwachsen diese vorderen Seitenplatten mit den getrennten Ambulacralia des hinteren Segmentes zu einem radialwärts konkaven großen bogenförmigen „Mundeckstück". Die vorderen Wirbel des am Mundskelett beteiligten Segmentpaares werden angelegt, aber später meist völlig resorbiert. Nach zur Straßen sollen sogar Reste eines noch weiter proximal gelegenen Ambulacraliapaares nebst der zugehörigen Ventralplatte (sehr spät) angelegt und erhalten bleiben. Der bleibende Wirbel besitzt auch ein zugehöriges Ventralschild. Zu den Seitenmundschildern und Mundeckstücken treten nun noch als sekundäre Gebilde zunächst die sogenannten Peristomplatten, dünne Gebilde, die in jedem Interradius in Einzahl, zu zweien oder mehreren auftreten können und sich von der Dorsalseite auf der Grenze von Seitenmundschildern und Mundeckstücken als Schutz für den Ringnerv und Ringkanal auflegen. Sie sollten nach Ludwig aus den ersten Peristomambulacralia hervorgehen. Sie sind selbst individuell variabel und können fehlen. Vor den dorsoventral stark ausgebreiteten oralen Mundeckplattenenden legt sich eine längliche, aus den die Zähne tragenden Stücken meist verschmolzene (bei Ophiarachna 5 teilige) Platte, der „Torus", der dorsal an der Mundöffnung von „Zähnen" (1 bis 3 Vertikalreihen), darunter von „Zahnpapillen" besetzt ist. Beides sind einfach Stacheln, von denen die ersteren von 2 den Torus durchsetzenden und an den Mundeckstücken ansetzenden Muskeln bewegt werden. Nur die beiden obersten Zähne haben eine etwas andere Muskulatur (2 obere und 2 untere Bündel), die sie befähigt, sich dorsoventral zu bewegen und so beim Zuschieben der Nahrung zu helfen. Die ventral den Rändern der Mundeckstücke direkt aufsitzenden Zähne werden Mund- oder Buccalpapillen genannt. Zähne sind immer, Mundpapillen häufig, Zahnpapillen seltener vorhanden. Letztere kommen nur bei Ophiocoma und Verwandten zusammen vor.

Das Peristomskelett weist 5 äußere Interradialmuskeln zwischen den Basen der Mundeckstücke auf, ferner 5 ventrale kleine Antagonisten der vorigen, die „inneren Interradialmuskeln", die die oralen, wegen der Konvexität wieder etwas divergierenden inneren Enden der Mundeckstücke verbinden, und endlich 5 ins Cölom vorspringende radiale Muskeln (dorsal und ventral) zwischen den Basen der Mundeckstücke. Das Peristomskelett der Ophiuriden bildet keinen gefährlichen Beißapparat, seine Muskeln gestatten zwar eine Verengerung und Erweiterung und außerdem können die Mundeckstücke durch freiere Artikulation an dem überhaupt in einigen Punkten abweichenden ersten Wirbel (hinter dem Peristomskelett) mit ihren oralen Enden gehoben und gesenkt werden, aber alle diese Bewegungen dienen nur der Aufnahme des Bodenüberzugs von Algen und Detritus usw., von dem sich die Tiere nähren.

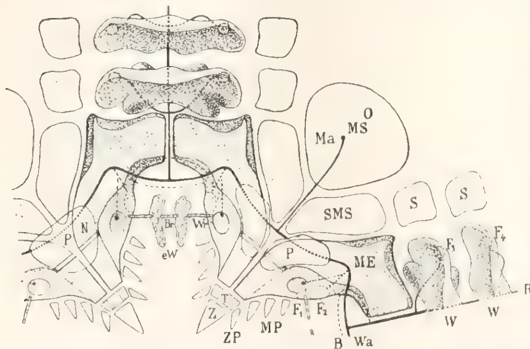


Fig. 42. Schema des Mundskelettes der Ophiuriden. Das Wassergefäßsystem Wa mit Ringkanal, Steinkanal, Radiärkanal und Füßchenkanälen ist durch eine dicke, bei Verdeckung gestrichelte Linie angedeutet, W Wirbel dunkel punktiert, S Seitenschilder schwach punktiert, ME Mundeckstücke, proximal aus den vordersten S, distal aus einem Wirbel gebildet und entsprechend punktiert, eW embryonal angelegte Wirbelhälften (löffelförmige Kalkstücke), die später verschwinden, Wr noch später angelegtes, allervorderstes rudimentäres Wirbelhälftenpaar, das nebst dem zugehörigen Bauchschild Br erhalten bleibt, B erste normale Bauchplatte, MS Mundschild („Orale" O) mit Madreporus Ma, SMS Seitenmundschilder, P Peristomalia, T Torus, Z Zahn, Zp Zahnpapille, MP Mundpapille, N Furche der Mundeckstücke für den Ringnerv. Original.

Das Sekundärskelett besteht nur aus Stacheln. Sie können auf der Scheibe stehen und das übrige Skelett dort verdecken (Ophiotrix und Ophiocoma). Sie fehlen immer den Ventralschildern und bevorzugen, wie wir sahen, die Seitenschilder, auf deren Derivaten im Peristom (proximaler Mundeckplattenteil) sie ja auch häufig auftreten. Auf den Seitenschildern bilden sie schräge Dorsoventralreihen, in denen der ventralste Tentakel unbekümmert um die Größe im ausgebildeten Zustande immer der älteste ist. Die Tentakelschuppen, die zuweilen zu mehreren neben einem Füßchenporus stehen können und das rückziehbare Füßchen schützen, sind nichts anderes als umgebildete, meist unbewegliche Stacheln, deren Uebergang in Stacheln bei den Cladophiuren leicht beobachtet werden kann. Die Stacheln können im ausgebildeten Zustand (Ophiotrichiden, Ophiohelus (Fig. 41, 5), Armende vieler Cladophiuren) oder bei der ersten Anlage (Ophiactis asperula, Ophiothrix fragilis) hakenförmig sein oder sich sogar zu zweien (die freilich nach derselben Seite sehen) auf einem Stiel erheben und dann an Pedicellarien erinnern (Trichaster elegans adoral neben den Füßchen, Astrophytum asperum). Die bei Gorgonocephaliden doppelte dorsale Quergürtel auf den Armgliedern bildenden Haken dienen wohl meist dazu, das Anheften zu erleichtern, epizoisch lebenden Formen das Klettern zu ermöglichen usw. (z. B. Ophiophthirius actinometrae, Asteronyx loveni). Rauhigkeiten und Dörnchen an den Stacheln sind ebenfalls häufig.

Die Stacheln pflegen hohl, d. h. von Bindegewebe ausgefüllt zu sein, durch das auch ein Nerv aufsteigt und Aeste durch die Stachelwand zu dem hohen Epithel entsendet. An der Basis wird der Stachel allseitig durch Muskeln mit der Platte verbunden.

Bei Ophiotrix kommen verzweigte, bei Ophiohelion und Ophiothela Stacheln mit terminaler Rosette vor; bei der wahrscheinlich schwimmfähigen Ophiopteron elegans sind 10 in schräger Horizontalreihe stehende, an der Spitze gegabelte dünne Stacheln der Seitenschilder durch eine große Schwimmhaut verbunden. Aehnliche, aber trichterförmige Häute spannen sich zwischen den 5 bis 6 schräg nach oben auseinandergehenden Verzweigungen von Rückenstacheln der Scheibe aus. Ophiotrix, Ophiomastix, Ophiocreas, Astroschema besitzen Stacheln, die an der Spitze eine starke, Sinneszellen und Giftdrüsenzellen tragende Epidermisanschwellung aufweisen. Bei Ophiopsila, deren Epithel an mehreren Stellen starke Wimperstreifen entwickelt, tragen auch die inneren, schon beweglichen Tentakelschuppen (die sogenannten „Wimperstacheln") zwei Streifen hoher Geißelepithelzellen, deren einzelne Härchen zu dicken Geißeln verschmelzen und wie andere Wimperstreifen der Ventralseite Wasser zum Mund hintreiben (Reichensperger).

Nervensystem, Epi- und Hyponeuralkanal. Das ventrale Nervensystem ist zwischen dem Epineural- und dem Hyponeuralkanal gelegen, die beide einen Mundring und radiale Kanäle bilden. Der auf die Einsenkung des embryonal noch im Ektoderm gelegenen Nervensystems zurückzuführende, in Wirklichkeit aber wohl zuweilen mesenchymatische Epineuralkanal, der bei Amphiura squammata und besonders Ophiactis virens sehr reduziert ist, trägt an seinem Boden das Epineuralsystem, in welchem der Unterschied von Stütz- und Ganglienzellen nicht so klar hervortritt wie bei den Asteriden. Der Hyponeuralkanal stellt den Ring- und Radiärsinus dar, von denen ersterer also nicht von einem inneren Ringsinus (vielmehr von einem Epineuralring) begleitet wird (Fig. 44), auch ist der Radiärsinus meist nicht verdoppelt wie bei Asteriden. Das hyponeurale Nervensystem liegt an der Ventralseite, am Ringteil an der Innenseite des radiären Sinus immer dem Ektoneuralsystem dicht angelagert und durch ein äußerst dünnes Häutchen davon getrennt. In den Radien finden sich zwei parallele Hyponeuralstränge, die aber nur in den dicken Anschwellungen, die dieses Nervensystem an der Dorsalseite zwischen den Wirbeln aufweist, ansehnliche Stärke aufweisen und hier auch quer verbunden sind. Von diesen Anschwellungen des wesentlich motorischen Hyponeuralsystems gehen jene beiden Nerven ab, deren Kanäle in den Wirbeln nach der Oralfläche führten. Dort treten die Nerven aus und spalten sich in einen dorsalen und ventralen Ast und versorgen die beiden Zwischenwirbelmuskeln oben und unten (Fig. 43). Distalwärts von den Muskelnerven geht jederseits von dem Ektoneuralband ein Hautnerv ab, der die Füßchenbasen streifend nach den Armseiten und dem Rücken aufsteigt, durch das Außenskelett seine Aeste zur Haut sendet und sich dort ausbreitet oder, bei Ermangelung eines eigentlichen Hautnervenplexus, im wesentlichen die Stacheln versorgt, unter deren Basis er ein kleines Ganglion bildet und in deren hohle Achse er eindringt. Ein proximalster Ast (vor den Palpen) dieser Hautnerven geht in das Dach des Epineurakanals (Region der Ventralplatte). Endlich geht ungefähr in gleicher Höhe oder noch weiter distalwärts noch ein Nerv jederseits vom Ectoneuralband ab und zwar zum Füßchen hin, um an der oralen Seite desselben ein halbringförmiges basales Ganglion zu bilden, von dem dann ein Nervenstrang an der adradialen Füßchenseite im Bindegewebe unter der Epidermis aufsteigt. Das basale Ganglion besitzt ein kleines Derivat des Epineuralraumes (Fig. 43).

Im Scheibenepithel der Arme werden die Hautäste jederseits durch einen „Lateralstrang" in Verbindung gesetzt, der an dem Bursalspalt entlang läuft, an seinem proximalen Ende noch einen besonderen Quernerv, den „Ludwigschen Nerv" aufnimmt und sich sowohl mit seinem oralen wie auch aboralen Ende als Plexus auf die Ventralseite der Scheibe begibt, die etwas sensibel zu sein scheint. — Zu dem zweiten Füßchen zieht noch (vor dem Ludwigschen Nerv) ein vom Radiärnerv abgegebener Füßchennerv und auch der benachbarte Hautnerv; dagegen wird das erste Füßchen vom Ringnerv aus versorgt. Auch ein kleiner Nerv für die Radiärmuskeln ist hier noch zu nennen. Der nervöse Ringkomplex mitsamt seinen beiden Schutzkanälen ist an den radialen Ecken durch spitze Zipfel mit den Radiärkomplexen verbunden. In den Interradien wird er aber durch die sehr hohen Mundeckplatten in die Höhe gehoben und läuft dort durch eine kleine Furche derselben. Vom Ringnervenkomplex, dessen hyponeuraler Teil in den Interradien unbeträchtlich ist, in den Radien aber kräftige Ganglien bildet, gehen radial 5 Paar ektoneurale Nerven zu dem ersten

Füßchenpaar, ferner interradial 1. nach innen 5 Paar ektoneurale Nerven unter dem Epithel des Peristoms zum Mund und Schlund, um sich auf dem Magen in ein Netz aufzulösen, 2. nach unten 5 Paar ektoneurale Nerven zu den Zähnen und Zahnmuskeln innen von den vorigen ab-

Die Füßchen sind in erster Linie zu Sinnesorganen geworden, zumal bei den Brachiophiuren, bei denen sie meist auch besonders leicht ganz zurückgezogen werden können. Man darf ihnen indessen nicht jede lokomotorische Bedeutung absprechen, denn Oestergren hat gezeigt, daß

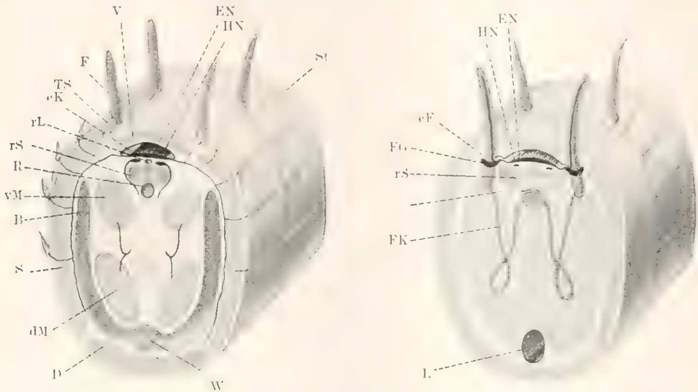


Fig. 43. Schematisierte Armstückchen mit Querschnitten, links zwischen zwei, rechts durch einen Wirbel hindurch gehend. St Stacheln, TS Tentakelschuppen, D Dorsalschild, S Seitenschilder, V Ventralschild, eK Epineuralkanal, EN epineurales Radiärnervenband, HN hyponeurale Nervenmassen, rS Radiärsinus, rL radiäre Lakune, R Radiärkanal, FK die die Wirbel durchsetzenden Füßchenkanäle, F Füßchen-Ambulacralpapillen, FG halbkreisförmiges Ganglion der Füßchenbasis mit Epineuralraum eF, vM ventrale, dM dorsale Wirbelmuskeln, L Leibeshöhle des Arms, B deren intervertebrale Blindsäcke, W Wimperstreifen. Nach Delage et Herouard.

gehend, je 3. ein Paar hyponeuraler Nerven zu den äußeren und 4. je ein wesentlich hyponeuraler Nerv zu den inneren Interradiär-, d. h. Mundeckstückmuskeln (Fig. 44).

Das aborale Nervensystem wird bei den Ophiuriden von einem Strang gebildet, der im Epithel des aboralen Sinus entsteht und dessen ringförmigen, interradial stark modifizierten Verlauf mitmacht (Fig. 45). Er scheint die Geschlechtsorgane und die Bursae zu versorgen, in deren Nähe er mit dem vom Lateralnerv proximal zur ventralen Scheibe gehenden Interradialnerv Fasern auszutauschen scheint.

Von besonderen Sinnesorganen ist nur wenig bekannt. Die Stacheln, die Füßchen, zumal die Mundfüßchen und auch der des Auges entbehrende Endtentakel haben wie auch die eine oder andere Partie der Körperwand (z. B. ventral) ein hohes Epithel mit sensorischen Funktionen und darunter kann sich dann eine größere Ansammlung nervöser Massen finden. So liegen unter dem Epithel der mit besonderen Papillenkränzen versehenen Füßchen von Ophiotrix auch besondere kleine aufeinanderfolgende Nervenringe.

Der hohen Ausbildung des Nervensystems entsprechend sind die Ophiuriden befähigt schnelle und hochkoordinierte Bewegungen auszuführen, über deren Analyse und Zurückführbarkeit auf einfache Reflexe keine Einigkeit herrscht.

Wassergefäßsystem. Die wichtigsten Besonderheiten des Wassergefäßsystems sind der Mangel der Saugscheiben und der Ampullen.

z. B. Ophiocoma an senkrechten Glaswänden heraufkriechen kann, also wie ein Astropectinide seine scheibenlosen Füßchen sehr wohl zum Anheften gebrauchen kann. Dies scheint besonders bei den Nectophiuren der Fall zu sein, die sich durch Schlangenwindungen der langen stark bestachelten Arme fortbewegen und bei denen auch die Füßchen zahlreiche Papillen tragen, die neben Sinneszellen zahlreiche Drüsen aufweisen, deren Sekret die Anheftung vielleicht unterstützt (Sterzinger, Reichensperger). Nach Cowles sollen die Füßchen auch organische Bestandteile (Nahrung) dem Mund zu transportieren. Bei den weniger stacheligen Brachyophiuren, die mit wenigen Ausnahmen auch der Drüsen entbehren (bei Ophiura ciliata einige an der Spitze der proximalen Füßchen, die verwandte Ophiura albida kann sich mit den proximalen Füßchen auch anheften) findet die Bewegung (bis zu 2 m pro Minute) sprungweise statt, indem ein Arm vorausgestreckt wird, dann die anderen den Körper etwas heben und vorwärts schieben (Fig 40).

Die Füßchen, die durch die Oeffnungen zwischen den Seiten- und Ventralschildern durchtreten und von Tentakelschuppen geschützt werden, sitzen mit ihrem basalen Ende in Vertiefungen der Wirbel unweit von deren distalem Ende, während sie ursprünglich auch wie bei Asteriden zwischen den Ambulacralia durchgetreten sein werden. Der Querkanal zu den Füßchen, der mit einer Klappe in ihr oberes Ende einmündet, läuft dadurch auch großenteils

im Kalkgewebe und macht einen Bogen oder eine Schleife darin, die allerdings an der distalen Wirbelfläche ein Stück weit hervorsehen kann (nicht beim 1. postperistomialen Wirbel, der aber auch die Eintrittsporen an der Adoralfläche trägt) (Fig. 42). Die Füßchenzuleitungskanäle entspringen einander gegenüber aus dem Radiärkanal. Der durch das Terminale austretende Endtentakel ist drüsenlos und wohl nur ein tastendes oder chemorezeptiv wirkendes Sinnesorgan. Der Radiärkanal läuft in der ventralen Armfurche, deren basaler Teil sich im ersten postperistomialen oder in zahlreicheren Wirbeln (Ophiocoma erinaceus) darüber schließen kann. Der Radiärkanal läuft oberhalb von dem Hyponeuralring, am Mundende gabelt er sich in die radiären Zipfel des Ringkanals, die zu den Interradien hin aufsteigen und dort die obere Seite der Mundeckstücke in einer kleinen, hinter der Nervenfurche gelegenen und bei Astrophytum arborescens seitlich geschlossenen Furche überschreiten. Auf diesem Wege geht adradial aus dem Ringkanal jederseits ein Kanälchen ab, das sich gabelt und in Furchen zu den bei den bei der Nahrungsaufnahme helfenden Mundfüßchen führt, deren Basen in Eindrücken der adradialen Wand der Mundeckstücke liegen. Interradial ist der Ringkanal ebenso wie in den Radien in Zipfel ausgezogen, an deren Spitze die kolbenförmigen Polischen Blasen liegen, die gewöhnlich 4 an der Zahl auftreten, d. h. im Steinkanalinterradius fehlen, oder auch dort in Einzahl (Ophiopsila annulosa und aranea) oder Mehrzahl (Ophiactis virens 2 usw.) auftreten oder durch eine Anschwellung des Steinkanalanfanges ersetzt werden (Ophiura ciliaris). Bei Ophiactis virens sind mindestens 6 und in den einzelnen Interradien bis zu 3 vorhanden, dazu kommen noch lange, innen mit dünnem Plattenepithel versehene, blindgeschlossene Schläuche (6 bis 10 pro Interradius), die vom Ringkanal oder vom Stiel der Polischen Blasen entspringen und sich zwischen die Organe überall einschieben — wahrscheinlich um bei dem Tier, dem die Bursae fehlen, deren Atmung zu ersetzen.

Da der Ringkanal interradial durch die Mundeckstücke weit dorsalwärts gehoben und andererseits die als Madreporenplatte funktionierende eine Oralplatte ventral liegt, so ist der Verlauf des engen Steinkanals beim fertigen Tier ein absteigender. Ventral mündet der Steinkanal in eine dünnwandige „Ampulle", aus der der Porenkanal nach außen führt. Die Ampulle stellt nach Mac Bride den Axialsinus dar, der sich hier wegen des umgekehrten Verlaufes des Steinkanals an dessen adzentraler Seite nach oben ausdehnt und ihn samt dem Axialorgan von hier aus einhüllt. Das Axialorgan (das auch als ovoide Drüse oder Herz bezeichnet wird) umgibt den Steinkanal und bildet sich als verdickte Wand eines abgeschlossenen Coelomsackes der den Steinkanal an seiner peripheren Seite begleitet und früher als Axialsinus betrachtet wurde (Fig. 44). Man kann ihn Pseudoaxialsinus nennen. Das Axialorgan stellt nach Mac Bride einen Geschlechtszellenherd, einen mit dem Genitalstrang zusammenhängenden Genitalstolo dar. Neben der Ampulle kann ein geschlossenes Säckchen, das Rudiment des rechten Hydrocöls, erhalten bleiben.

Oft ist nur eine Oeffnung in der Madreporenplatte vorhanden, sie genügt zum Ersatz des Wasserverlustes, der bei den wenig saugenden Füßchen gering ist. Zuweilen treten mehrere Oeffnungen auf (Amphiura holbolli, Ophiolepis imbricata, Ophionereis annulata, Ophiopsila aranea (1 bis 3) und annulosa (11 bis 12), mehrere Ophioplocus- und Ophiocnidaarten. Bei Ophiactis virens treten (in Rücksicht auf die Schizogonie) bei erwachsenen (meist 6armigen) Tieren mehrere Steinkanäle (mit Axialkomplex!) auf, bis zu 5, wobei die anderen Oralplatten als Madreporenplatten herangezogen werden. Trichaster elegans und Euryola haben 5 Steinkanäle mit je 1 Porus ohne oder mit 5 Madreporenplatten, sehr häufig aber bekommen die bei Cladophiuren oft auf 5 (bei Gorgonocephalus eucnemis zuweilen auf 3) vermehrten Steinkanäle bei den Gorgonocephalidae eine außerordentlich große Zahl von Poren kanälen (bis 250 auf einer Platte und mehr). Histologisch ist über das Wassergefäßsystem zu bemerken, daß es äußerlich teils vom Cölomepithel (Ringkanal [partim] und Polische Blasen), teils einseitig oder ganz von Sinus (Radialsinus, Axialsinus mit Axialorgan) oder vom Epidermisepithel (Füßchen, Tentakel) umhüllt wird. Nach innen folgt dann das Binde- oder das Kalkgewebe, das an einigen Stellen jedes benachbarte äußere Epithel weit abdrängt (Füßchenzuleitungskanäle). Das innere hydrocölische Epithel ist pflasterartig und bewimpert, in den Füßchen mit einer Wimper pro Zelle, im Stein- und Porenkanal ist es sehr hoch, in der Ampulle sehr niedrig und außen von einer zuweilen durch Falten eine Ringmuskularis vortäuschenden Grenzmembran umgeben. Die Polischen Blasen, der Ringkanal und die intervertebralen Teile des Radiärkanals haben Ringmuskulatur, die Füßchen kräftige Längsmuskelfasern (und nach Mortensen bei Ophiopus

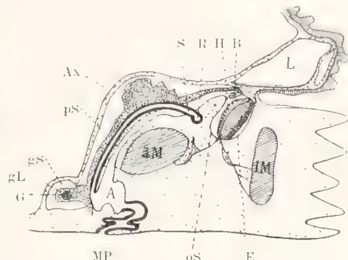


Fig. 44. Schnitt durch den Steinkanalinterradius eines Ophiuriden. R Ringkanal, S Steinkanal, A „Ampulle", nach Mac Bride axialer Sinus, MP Madreporit, Oeffnung des Porenkanals, Ax Axialorgan, Genitalstolo, ovoide Drüse, pS pseudoaxialer Sinus, nach Mac Bride ein Derivat des Cöloms, früher als Axialsinus betrachtet, G Genitalstrang, gL genitale-aborale Lakune, gS Genital-Aboralsinus, B orale Ringlakune, H hyponeurale Nervenmasse des Nervenringes, oS Oralsinus, E Epineuralkanal über dem epineuralen Ringnervenanteil, äM äußere, iM innere Interradialmuskeln, L peristomaler Abschnitt der Leibeshöhle. Nach Hamann, doch verändert.

arcticus schwächere Ringmuskelfasern) an der Basis des Hydrocölepithels. In der Inhaltsflüssigkeit trifft man Amöbocyten.

Leibeshöhle. Die wenig geräumige Leibeshöhle wird von Aufhängesträngen für Darm und Bursae durchsetzt und durch die von der Oralseite zum Darm ziehende ringförmige Peripharyngealmembran in einen großen dorsalen Teil und einen Peripharyngealraum geschieden, (in welch letzterem weiter zentralwärts noch eine entsprechende Trennung auftreten kann (Fig. 44, L). In den Armen ist die Leibeshöhle bis auf einen dorsalen Kanal eingeschränkt, der allerdings zwischen den Wirbeln, seinen Hauptverdrängern, jederseits Blindsäcke nach außen von den Muskeln hinuntersendet (Fig. 43). Auf dem Grund dieser Blindsäcke und entlang der Dorsalseite des Armcölomkanals findet sich hohes Wimperepithel, das für die Flüssigkeitsbewegung sorgt, sonst ist die Leibeshöhlenwand mit dem gewöhnlichen niedrigen Wimperepithel ausgekleidet. Die Inhaltsflüssigkeit ist eiweißhaltig und enthält oft syncytienbildende Amöbocyten mit Exkretkörnern usw.

Darm. Der afterlose, nicht vorstülpbare und auch eigentlicher Blindsäcke entbehrende (nur von den Bursae etwas eingedrückte) Darm ist einfach sackförmig (Fig. 45, M), ohne wohlabgesetzten Oesophagus usw. Er wird durch unregelmäßige dorsale, ferner durch 5 Paar radiale, von den ersten Armwirbeln ausgehende, und 5 Paar interradiale von den Mundeckstücken herkommende Bänder gehalten, zu denen sich ventral noch die Peripharyngealmembran gesellt. Alle die Bänder haben bindegewebige Füllung und Cölomepithelüberzug. Der runde Mund liegt noch etwas höher als das Oberende der Mundeckstücke, in der Mitte der (zuweilen kleine Kalkkörper enthaltenden) Peristommembran, die sich ungefähr bei der Nervenfurche an die Mundeckstücke ansetzt. Der Eingang zum Mund wird durch die Mundeckstücke in 5 radiale Mundwinkel zerlegt. — Histologisch besteht der Magen aus einem inneren wimpernden Epithel mit der darunterliegenden Nervenschicht, einer ziemlich dünnen Bindegewebslage, einer Ringmuskelschicht und dem Cölomepithel. Ueber Nahrung und Nahrungsaufnahme s. oben S. 386.

Blutlakunensystem. Die Ringlakune läuft dorsal neben dem Hyponeuralring, eingedrückt in den oralen Sinus (nahe am Peripharyngealraum), die radiären Lakunen finden sich dorsal von den radiären Hyponeuralnervensträngen und ragen von hier in den Hyponeuralkanal hinein, zuweilen von einem den Sinus in zwei zerlegenden dünnen Häutchen bis an die Dorsalwand fortgesetzt. Die Radiallakune entsendet kleine Füßchenlakunen. Die aborale Lakune läuft in der eingedrückten Furche des genitalen Sinus, den Genitalstrang mehr oder weniger umhüllend. Sie folgt ihm in die ventralen interradialen Zipfel und auch in die zur radialen Seite der Bursae entsendeten Aeste, wo sie sich in kleine Lakunen der Gonadenwand fortsetzt (Fig. 45). Radial kommuniziert die aborale Lakune durch das Bindegewebe von Darmaufhängesträngen mit dem sehr feinen Lakunennetz des Darmes, der hier mehr noch als bei den Asteriden großer gesonderter Blutgefäße entbehrt.

Das Axialorgan (Herz, ovoide Drüse usw.), das den Steinkanal fast umhüllt und zum Teil als Speicherniere funktionieren soll, in der die Exkretstoffkörner degenerierender Amöbocyten deponiert werden, enthält natürlich auch viele Lakunen, die mit der Oral- und Aborallakune in Zusammenhang zu sein scheinen. Andere betrachten das Axialorgan als Genitalstolo.

Geschlechtsorgane. Im Steinkanalinterradius trennt sich bei den ganz jungen Tieren ein kleiner Divertikel der Leibeshöhle ab, der neben den echten Axialsinus zu liegen kommt und den Steinkanal umhüllt. Dieser Pseudoaxialsinus (Fig. 44 pS) entwickelt an seiner inneren Wand einen Stolo von Geschlechtszellen (das Axialorgan), der sich nun auf der Dorsalseite ringförmig durch alle Interradien zu einem geschlossenen Kranz auswächst. Diese Genitalrachis, die hier deutlicher als bei anderen actinigonidialen Eleutherozoen auch beim alten Tier bestehen bleibt, wird überall von einem aboralen Sinus (Fig. 44, g S) begleitet. Direkt über dem Madreporit liegt endlich noch ein geschlossenes Bläschen, der Rest des rechten Hydrocöls. Auch der aborale Sinus wird ursprünglich als Cölomdivertikel im Steinkanalinterradius gebildet und dehnt sich mit dem Genitalstolo (G) und der aboralen Lakune gemeinsam aus. Die Lakune (gL) liegt zwischen Cölomepithel und dem Epithel des darunterlaufenden Sinus, den sie von der Cölomseite her eintreibt. Ziemlich außen in dieser Eintreibung liegt dann der Genitalstrang. Der ganze Aboralkomplex bekommt 5 interradiale Ausbuchtungen, deren Winkel auf die Ventralseite bis in Nähe der Oralplatten gezogen sind. Die Schenkel dieser Winkel laufen dabei den Armbasen parallel und in der interradialen Wand der dort befindlichen Hauteinstülpungen, der Bursae. Außerdem aber entsendet jedes Schenkelende der interradialen Winkel einen blindgeschlossenen Ast des Aboralkomplexes an der adradialen Wand der Bursae entlang (Fig. 45). An den die Bursae flankierenden Teilen des Aboralkomplexes bildet nun die Genitalrachis je eine (Ophiotrix) oder eine ganze Anzahl von birnförmigen Anschwellungen, d. h. von Gonaden, die dicht unter ihrem Ansatzpunkt an die Genitalrachis ihre persistierenden oder immer neugebildeten Oeffnungen in die Bursae haben. Die Geschlechter sind getrennt, die Ovarialeier mit Follikel versehen. Amphiura squammata und Ophioglypha sind Zwitter, sie besitzen je einen (adradialen) Hoden und ein (interradiales) Ovar an jeder Bursa. Ophiactis virens hat keine Bursae und dementsprechend münden die Gonaden direkt durch interradiale Poren nach außen. Im allgemeinen sind die Geschlechter, von Farbenverschiedenheiten abgesehen, nicht verschieden. Nur bei einigen brutpflegenden Formen können die Bursae und die Bursalspalten der Weibchen größer sein. Bei Ophiacanta vivipara sind die ♂ 5-, die ♀ 6- bis 8strahlig.

Die (bei Ophiopus arcticus rudimentären) selten (Ophiactis virens, Ophiomusium [?] pulchellum, flabellum und Microphiura decipiens) fehlenden 10 Bursae sind sackförmige Epidermiseinstülpungen, deren spaltförmige Oeffnungen an der Ventralseite der Scheibe direkt neben den Armbasen liegen und von Bursalspangen und Schuppen verstärkt werden. Zuweilen ist diese Oeffnung in der Mitte geschlossen, so daß ein proximaler und distaler Schlitz (z. B. Ophioderma longicauda) zustande kommt. Im Inneren buchten die Bursae den Magen von unten ein und pflegen sich mit

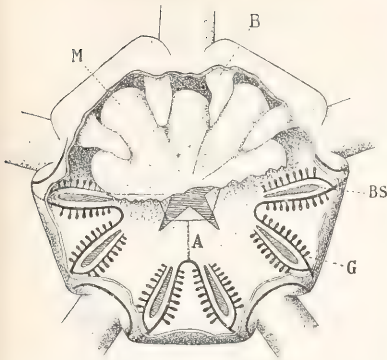


Fig. 45. Scheibe von Ophioglypha albida juv., dorsal geöffnet, um den Magen M und die Oberenden der Bursae B zu zeigen. In der unteren Hälfte sind diese Teile entfernt, um den Mund, die Orallakune, den Axialkomplex A und den aboralen Sinus-Lakunenkomplex mit dem Genitalstrang und den Gonaden G zu zeigen. Diese Teile sind schematisch in die durchsichtig gedachte Körperwand eingetragen. BS Bursalspalten, schematisch. Nach verschiedenen Figuren Ludwigs neu kombiniert. 5,6:1.

einem dorsalen Lappen auf die dorsale Darmseite zu schieben. Sie können einfach sackförmig oder mehr lappig sein (Ophioderma). Bei Ophioderma sitzen die Geschlechtsorgane nur auf der interradialen Seite am distalen Ende, ihre Produkte scheinen also durch die peripher gelegene Spalte allein entleert zu werden. Vom Cölom nach außen gehend trifft man in der Bursalwand außen das Leibeshöhlenepithel, dann eine oft Kalkkörper führende Bindegewebslage und endlich das eingestülpte deutliche Ektodermepithel, das an vielen Stellen, zumal in der Nähe der Mündung kräftig bewimpert ist. Diese Wimpern befördern eine Wasserströmung in den Bursae, die noch unterstützt werden kann durch Kontraktion der Scheibe (Ophiotrix fragilis, Ophiura ciliaris, Amphiura squammata und Ophioglypha albida, Etienne 1910), die von Muskeln bewirkt wird, welche sich von den Bursalplatten in Paaren zu den Adradialplatten der Scheibe ziehen. Die Bursae dienen nämlich in erster Linie der Atmung, die bei Ophiactis virens, die keine Bursae hat, von eigenartigen langen Polischen Blasen besorgt wird.

Brutpflege. Es kann nicht wundernehmen, daß die Bursae, die von den Eiern passiert werden müssen, oft als Bruthöhlen benutzt werden (Ophioglypha hexactis, Amphiura sguammata, magellanica und patagonica, Ophiacantha vivipara, anomala, marsupialis und imago sowie bei Ophiomyxa vivipara). Nach dem Aufenthalt in den Bursae können die Jungen sich noch auf dem alten Tiere aufhalten (Ophiacantha vivipara). Bei anderen Formen (Hemipholis cordifera, Ophiactis kroyeri und asperula) hat man die Jungen auf den alten Tieren gefunden.

Regeneration, Autonomie, Schizogonie. Die Arme regenerieren sehr leicht und die Regeneration beginnt um so lebhafter je größer das verlorene Stück war (in Scheibennähe schneller). Bei manchen Formen unterbleibt die Armregeneration nach Durchschneidung des Ringnerven. Die Arme können vielfach leicht autotomiert und dann ersetzt werden, Amphiura rosacea soll die dorsale Scheibenseite mit den Eingeweiden auswerfen und regenerieren. Microphiura decipiens und Ophiacantha können gleichfalls die Scheibe abwerfen. Ophiactis, Ophiocoma und Ophiothela zeigen Schizogonie, sie zerreißen sich in der Mitte der Scheibe durch einen Riß von Interradius zu Interradius, wonach dann das dreiarmige Stück sich zu einem sechsarmigen, das zweiarmige zu einem vierarmigen ergänzen kann. Die sechsarmige Ophiactis virens zerreißt sich in zwei dreiarmige Hälften ohne Rücksicht auf Steinkanal usw. und stellt sich wieder her. Der Prozeß ist hier so häufig, daß er eine wesentliche Vermehrungsform darstellt.

b) Systematik. Zur Abgrenzung der Ordnungen wird in erster Linie das Verhalten der Armplatten, besonders der Wirbel und ihrer Artikulation benutzt. Die wichtigsten Merkmale zur Unterscheidung der Familien liefern die Stacheln, speziell die des Peristomskeletts.

Klasse. Ophiuroidea Norm. 1865.

1. Ordnung. Streptophiurae Bell 1892. Amb. opponiert, mehr oder weniger unvollkommen (z. B. nur an den Enden) verschmolzen. Das Wirbelgelenk einfach (2 niedrige Buckel und Pfannen jederseits), so daß der Arm nach oben und unten gekrümmt werden kann. Aeußere Armplatten sehr verschieden, manchmal (Ophiomyxa part.) alle rudimentär. Diese Gruppe ist schlecht definiert und bildet ein Konglomerat primitiver (alle?) Formen.

Familie. Ophiomyxidae. Provisorische Familie für die lebenden Streptophiuren, von denen bei Ophioteresis die Ventralschilder fehlen, bei Ophiobyrsa (Ophiomyxa part.) und Neoplax die Dorsalschilder rudimentär sind und bei letzterer auch die paarigen Adradiala fehlen, während bei Ophiomyxa, Hemieurale und Sigsbeia mehrere meist kleinere Platten das dorsale Armskelett zu vertreten pflegen. Der Name Ophiomyxa nimmt auf das Vorhandensein der weichen Haut mit hoher Epidermis Bezug.

2. Ordnung. Cladophiurae (Euryalae) Wirbel durch Sattelgelenke verbunden; daher sind die oft dichotomisch verzweigten Arme stark beweglich und können Gegenstände umschlingen. Sie sind besonders nach der Ventralseite hin stark einrollbar. Haut gewöhnlich weich und mit Kalkeinlagerungen versehen.

1. Familie. Gorgonocephalidae. Eine oder 5 siebartig durchbohrte Madreporenplatten. Wenigstens die Enden vieler Arme zeigen auf dem Rücken jeden Gliedes einen meist zweireihigen Gürtel kleiner beweglicher Häkchen, die auf der Warze kleiner Kalkplättchen stehen. Die einander ähnlichen stachelartigen Zähne, Zahnpapillen und Mundpapillen bilden an der Spitze der Kiefer einen unregelmäßigen Haufen. Ventralschilder rudimentär oder fehlend. Tentakelschuppen, wenn nicht verkümmert, zu mehr als zweien neben den Tentakeln. Arme und Scheibe stark granuliert. Die Oberfläche der äußeren Armteile mit dicken, von kleinen Poren durchlöcherten Kalkteilen. Bei den Astrochelinae, die einfache (Astrotoma usw.) oder

nur am Ende verzweigte Arme (Astrocnida usw.) haben, fehlen interradiale akzessorische Kalkplatten außerhalb der Seitenmundschilder (Granulierung stark). Bei den Gorgonocephalinae (Gorgonocephalus, Astrophytum usw.) sind die Arme in ganzer Ausdehnung verzweigt, und interradiale akzessorische Platten vorhanden (Granulation oft schwach).



Fig. 46. Gorgonocephalus caput medusae L. (lincki M. Tr.). Beachte die Armverzweigung, die Bursalspalten usw.

2. Familie. Trichasteridae. Steinkanalmündung auf Hautpapillen oder, wenn Madreporenplatten vorhanden (Euryala) immer nur mit einem Porus. Häkchengürtel fehlen. Die wohlentwickelten, wenigen Zähne in einer Vertikalreihe, Zahnpapillen rudimentär oder wie die Mundpapillen meist fehlend. Tentakelpapillen gut ausgebildet, fast an allen Gliedern, meist zu zweien neben jedem Tentakel. Ventrale Armschilder einfach, klein, aber vorhanden. Keine akzessorischen interradiären Platten. Arme und Scheibe mit nackter oder fein granulierter Haut. Bei Trichaster und Euryala dünne Gitterplatten in der Armhaut. Die mit einfachen (Astroschema usw.) oder nur am Ende verzweigten Armen (Trichaster, Sthenocephalus) versehenen Astroschematidae haben keine äußeren Madreporenplatten, während die Euryalinae (Euryala), deren Arme in ganzer Ausdehnung verzweigt sind, äußere einporige Madreporenplatten besitzen.

3. Familie. Asteronychidae. Asteronyx mit gut abgesetzter, großer, erhobener Scheibe mit in der Mitte hervortretenden Adradialia. Arme einfach, ohne Dorsalschilder. Seitenschilder polsterartig mit hohlen Armstacheln. Stachelförmige Zähne und Zahnpapillen. Auch einige Mundpapillen vorhanden. Glatte, nackte Haut. — Hierhin auch Astrodia tenuispina.

3. Ordnung. Zygophiurae Bell 1892. Ophiuroidea mit zygospondylen Gelenken, die eine erhebliche Bewegung in dorsoventraler Richtung unmöglich machen. Die Arme sind einfach und immer mit Dorsal-, Ventral- und stacheltragenden Lateralschildern versehen. In diese Gruppe werden jetzt gewöhnlich auch einige Formen (Ophiohelus, Ophiotholia, Ophiambix) eingereiht (Pectinura zu den Brachiophiuren), die mehr oder weniger streptospondyle Gelenke und zum Teil kleine verstreute (Ophiomyces) oder gar keine dorsale Armschilder (Ophioscolex, Ophiosciasma, Ophiogeron alle zu Nectophiuren) haben.

I. Unterordnung. Brachyophiurae E. Perrier 1891. Armstacheln kurz, parallel zur Armachse, anliegend. Fortbewegung „springend". Füßchen wesentlich sensorisch und respiratorisch tätig.

1. Famile. Ophiodermatidae. Ohne Zahnpapillen, mit zahlreichen Mundpapillen. Oft Einschnitte in die Scheibe an der Armbasis. Bursalspalten einfach oder doppelt. Hierhin Ophioderma, Ophiogona, Pectinura, Ophiopyren usw.

2. Familie. Ophiolepididae. Zahnpapillen fehlen, 3 bis 6 Mundpapillen, von denen die innerste selten infradental. Mit Armeinschnitten an der Scheibe und einfachen Bursalspalten. Zu dieser von den Ophiodermata nicht scharf geschiedenen Familie Ophiolepis, Ophiopyrgus, Ophiura (Fig. 40), Ophiomusium, Gymnophiura usw.

II. Unterordnung. Nectophiurae E. Perrier 1891. Die längeren Armstacheln stehen ungefähr senkrecht zur Armachse. Die drüsenreichen Füßchen unterstützen die Fortbewegung, die sich durch Schlangenbewegungen der im Verhältnis zur Scheibe gewöhnlich besonders langen Arme vollzieht

I. Sektion. Oligodontida Meißner 1901. Wenige oder keine Zahnpapillen.

1. Familie. Amphiuridae. Mit 1 bis 5 Mundpapillen, Arme auf der Ventralseite der Scheibe eingesetzt. Bursalspalten einfach. Hierhin Ophiambix, Ophiopholis, Ophiopus, Ophiactis, Amphiura, Ophiocnida, Ophiopsila usw.

2. Familie. Ophiohelidae. Zähne und Mundpapillen vorhanden, keine Zahnpapillen. Scheibe mit Schuppen und spitzen oder stumpfen Stacheln. Wirbel zuweilen unvollständig verwachsen und streptospondyl. Hierhin Ophiomitra, Ophiothamnus, Ophiocoma, Ophiohelus, Ophiotholia.

3. Familie. Ophiacanthidae. Die Schuppen der Scheibe mehr oder weniger unter einer weichen Haut verborgen. Hierhin Ophiacantha, Ophioscolex, Ophiotrema usw.

2. Sektion. Polyodontida Meißner 1901. Mit zahlreichen Zahnpapillen.

1. Familie. Ophiocomidae. Mundpapillen vorhanden. Scheibe wenigstens dorsal meist körnig oder weichhäutig, seltener geschuppt und mit großen Adradialia. Die ziemlich kleinen

Mundschilder interbrachial nicht verlängert. Arme auf der Ventralseite der Scheibe entspringend, mehr oder weniger nackt oder häutig, mit mittelgroßen oder langen Stacheln auf den Kielen der Lateralschilder. Hierhin Ophiocoma, Ophiopteris, Ophiomastix usw.

2. Fam. Ophiotrichidae. Ohne Mund, aber mit Zahnpapillen (8 bis 10), 2 bis 4 Vertikalreihen. Dorsale Armschilder rückgebildet. Adradialschilder der Scheibe sehr groß. Hierhin Ophiopteron, Ophiotrix, Ophiotrichoides, Ophiocnemis, Ophiothela, Gymnolophus usw.

Literatur. *Von der umfangreichen Literatur über Stachelhäuter können hier nur einige zusammenfassende Darstellungen genannt werden, in denen man auch ausführliche Literaturangaben findet:* ***Bronns*** *Klassen und Ordnungen des Tierreichs,* **II.** *Bd., 3. Abteil. Echinodermen (Stachelhäuter) von* ***H. Ludwig,*** *fortgesetzt von* ***O. Hamann.*** *Leipzig 1889 bis 1907.* — ***F. A. Bather, J. W. Gregory and E. S. Goodrich,*** *The Echinoderma. Part III von A Treatise on Zoology edited by* ***E. Ray Lankester.*** *London 1900.* — ***Y. Delage und E. Hérouard,*** *Traité de Zoologie concrète. Vol.* **III.** *Les Échinodermes. Paris 1903.* — ***A. Lang,*** *Lehrbuch der vergleichenden Anatomie der wirbellosen Tiere. Jena 1894.*

S. Becher.

Stachelhäuter.

Paläontologie.

Einleitung. I. Pelmatozoa. 1. †Edrioasteroidea. 2. †Carpoidea. 3. †Cystoidea. 4. †Blastoidea. 5. †Crinoidea. II. Echinozoa. 1. Echinoidea. 2. Holothurioidea. III. Asterozoa. IV. Asteroidea. 2. †Auluroidea. 3. Ophiuroidea. Zusammenfassung.

Einleitung. Weit zurück, bis in die Zeiten der mittleren, vielleicht gar des unteren Kambrium (†[1]) Platysolenites)[2]) sind die Echinodermen zurückzuverfolgen, und seit ältestpaläozoischer Zeit sind auch die großen Unterstämme der Pelmatozoa, sowie jene der Echinozoa und Asterozoa, welche im zoologischen Teil (S. 407) als Eleutherozoa zusammengefaßt sind, durch Fossilfunde bekannt. Dabei hat das überlieferte fossile Material besonders der Pelmatozoa unsere Kenntnis dieses Unterstammes ungemein bereichert. Hier ist eine große Anzahl eigenartiger ausgestorbener Typen bekannt geworden, welche dem Material aus jüngeren geologischen Zeiten so sehr fremdartig gegenüberstehen, daß sie als eigene, mehr oder weniger geschlossene Klassen neben die bis heute fortlebenden Crinoidea gestellt werden müssen. Aber auch aus dem Bereich der Eleutherozoa lehrt uns die Vorzeit bei den Asterozoa wie bei den Echinozoa eine stattliche Menge von Formen kennen, die sich scharf von den lebenden abheben und eine zum Teil sehr wesentlich anders gerichtete Entfaltung dieser Unterstämme zeigen, als sie aus jüngeren Typen und aus deren Ontogenie geschlossen werden könnte. Bei kaum einem anderen Stamme der Wirbellosen lassen sich so viele scharfe Scheidungen zwischen paläozoischen und meso-känozoischen Typen erkennen, wie bei den Echinodermen; selbst bei den Coelenteraten oder Arthropoden und Brachiopoden ist der Schnitt in der Stammesentfaltung um die Wende vom Paläozoikum zum Mesozoikum kein so vielfältig scharfer, wie er bei den Echinodermen nach dem bis jetzt bekannten Material zu bemerken ist. Wie heute, so sind auch aus der Vorzeit Echinodermen nur aus marinen Lebensbezirken bekannt.

I. Unterstamm. **Pelmatozoa.** Leukkart. (?Unterkambrium, Mittelkambrium bis Jetzt); vgl. S. 306).

Wenn neben dem vorwiegenden Besitz eines Stieles die stete Lage des Mundes und der Ambulakralstämme auf (oder unter) der nach oben gekehrten Seite (oder „Decke") des napf-, becher, kugel- bis sackförmigen Kelches (der Theka) der ausschlaggebende Charakter der Pelmatozoen genannt werden muß, dann sind mit der heute noch lebenden Klasse der Crinoideen die paläozoischen Klassen der †Edrioasteroidea, †Carpoidea, †Blastoidea und †Cystoidea als Pelmatozoen zu vereinigen, obwohl jeder dieser Klassen im Bau des Kelches, der Kelchtafeln, des Ambulakralsystems so viele, sie von den Crinoideen trennende Momente eigen sind, daß ihre volle Stammeseinheit mit den letzteren kaum zu beweisen ist. Dazu sei erwähnt, daß vielfach auch noch heute die Klassen der †Edrioasteroidea, †Carpoidea und †Cystoidea als eine Klasse †Cystoidea v. Buch zusammengefaßt werden (v. Zittel), denen wohl auch die Klasse der †Blastoidea zugezählt wird (v. Stromer).

Da das Hautskelett der Pelmatozoa aus meist sehr zahlreichen Skelettelementen — Kelchtafeln, Stiel- und Armgliedern — besteht, welche meistens nicht besonders fest miteinander verbunden sind, so sind ganze Skelette immerhin Seltenheiten; sie finden sich meist nur in solchen mergligen, kalkigen und tonigen Ablagerungen, die in ruhigeren Meeresteilen abgesetzt worden sind.

Nicht nur an Haupttypen der Pelmatozoen ist das Paläozoikum reicher als die jüngeren Formationen, sondern auch die Zahl der Gattungen und Arten ist in den silurischen bis karbonischen Gesteinen eine um vieles größere als in den Sedimenten der folgenden Zeiten.

1. Klasse. †Edrioasteroidea Billings, Bather (†Thecoidea, Jaekel). Mittelkambrium bis Unterkarbon. (Fig. 1, 2.)

[1]) † vor einem Gruppen-, Gattungs- oder Artnamen bedeutet: nur fossil bekannt.

[2]) Vielleicht Stielglieder von Pelmatozoen aus dem Unterkambrium des Baltikum.

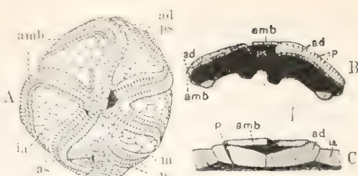


Fig. 1 A bis C. †Edrioaster Bigsbyi Bill. Untersilur; Ottawa, Kanada. A Oberseite der Theka; B Schnitt durch den rechten vorderen Radius und linken hinteren Interradius; Unterseite dünn getäfelt mit einem Randrahmen dickerer Tafeln; C Querschnitt durch ein Ambulakrum. ad adambulakrale oder subambulakrale Thekalplatten; amb ambulakrale Saumtafeln, nur auf dem vorderen und linken vorderen Radius in A gezeichnet; as feingetäfelte Afterlücke; ia Interambulakraltafeln; m Madreporit; p Poren zwischen den subambulakralen Tafeln (ad); ps Mundlücke, in A zum Teil von vergrößerten Saumtafeln bedeckt. Nach Bather. Aus v. Zittel.

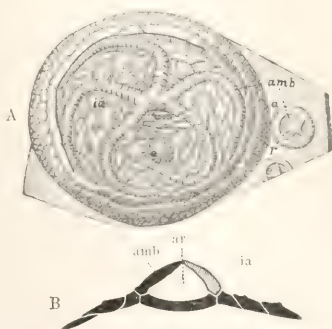


Fig. 2 A, B. A †Agelacrinus hamiltonensis Vanux. Mitteldevon, Hamilton, N. Y. Oberseite links eines erwachsenen, rechts jugendlicher Tiere. a After; amb Ambulakra, in der Jugend gerade, später gekrümmt; r gröbere, schuppige Randtafeln. Nach J. M. Clarke. Aus v. Stromer.

B schematisierter Schnitt durch ein Ambulakrum. amb Saumplatten; ar Ambulakralrinne; ia imbrizierende Interambulakraltafeln. Nach Jaekel. Aus v. Stromer.

Sehr zahlreiche, ± unregelmäßig polygonale bis schuppenförmige dichte Täfelchen setzen die nicht starre, polster- bis sackförmige Theka von fünfseitigem bis ± kreisrundem Umriß zusammen. Die aborale, ± flache Seite der bis höchstens 5 cm im Durchmesser erreichenden „Kelche" lag entweder frei dem Meeresboden auf (†Stromatocystis) oder sie war irgendwo aufgewachsen (†Agelacrinus); Stielbildung fehlte vollständig. Inmitten der Oberseite liegt die von kleinen Täfelchen bedeckte Mundöffnung, von der, auf die Oberseite beschränkt, 5 Ambulakra ausstrahlen, die entweder gerade oder bei manchen Formen solar (auch antisolar) gekrümmt verlaufen. Die Krümmung der Ambulakra stellt sich bei späteren Wachstumsstadien ein; sie bedeutet bei größerer und dann für die Ernährung günstigerer Entfaltung der Ambulakra ein Vermeiden des Hinübergreifens auf die Unterseite (bei †Edrioaster Bigsbyi ist eine teilweise Ausnahme von dieser Regel zu beobachten). Die Ambulakra sind einfache, auf der Kelchdecke verlaufende Rinnen, welche von ± alternierenden Saumplatten begleitet und bedeckt werden (ob auch kleinere Deckplättchen vorkommen, ist nicht genügend sicher gestellt). An der Außengrenze der ambulakralen Saumplättchen gegen die subambulakralen Kelchplatten können Poren auftreten, wie auch zwischen den Saumplättchen Poren beobachtet sind (†Edrioaster). Der interradial auf der Oberseite liegende After ist von einer Täfelchenpyramide bedeckt. Das Vorkommen eines Madreporiten (mit einem feinen Schlitz) wird bei †Edrioaster angegeben.

Im mittleren Kambrium Böhmens und des Baltikums kommen recht rar die ältesten Vertreter der Familie †Edrioasteridae vor: †Stromatocystis Pomp. (mit geraden Ambulakren, die Thekalplatten sind an ihren Rändern von Poren durchsetzt [nach Jaekel nur mit Grübchen besetzt]). †Edrioaster Bill. (mit gebogenen Ambulakren, mit Poren oder Grübchen an den subambulakralen Platten) ist ein polsterförmiger Typus aus dem Untersilur, und †Dinocystis Bather ist eine sonst ähnliche aber mit relativ kleiner aboraler Fläche festgewachsene Form aus dem Devon.

Die sack- bis becherförmigen †Cyathocystidae mit sehr kleinen Kelchtäfelchen, mit kurzen geraden Ambulakren, zwischen denen die Täfelchen der Oralseite zu größeren Deltoidtafeln verwachsen sein können (†Cyathocystis F. Schm., †Thecocystis Jaek., †Cytaster Hall) sind untersilurische Formen aus Europa und Nordamerika.

Vom Untersilur bis ins Unterkarbon sind die †Agelacrinidae zu verfolgen: mit großer aboraler Fläche aufgewachsene scheiben- bis polsterförmige, kleine Gestalten mit schuppenartig übereinander greifenden kleinen Thekalplatten; die schmalen, den Platten der Theka aufliegenden, Ambulakra sind bei †Hemicystis Hall (Untersilur) kurz, gerade, bei †Agelacrinus Vanux., Hall (Untersilur — Unterkarbon) in der Jugend gerade, später gekrümmt.

Bather stellte zu den †Edrioasteroideen auch den eigenartigen Typ der †Steganoblastidae Whiteav., doch die Form ist gestielt, im Kelch ist die Ausbildung basaler, radialer, interradialer und oraler Platten zu bemerken, und in der Form der lanzettlichen Ambulacra ist größere Aehnlichkeit mit den „Parablastoidea“ (vgl. †Blastoidea) vortretend; aber die Ambulacra sollen den gleichen Bau zeigen wie die von †Edrioaster und wie bei den übrigen Edrioasteroideen soll jede Spur von Armen oder Pinnuletten fehlen.

Mit den übrigen Pelmatozoen haben die Edrioasteroideen recht wenig gemein; vielleicht stehen sie manchen der †Diploporita näher?

2. Klasse. †Carpoidea Jaekel (†Carpoidea heterostelea Jaekel, Amphoridea Haeck. e. p., Bath.) Mittelkambrium bis Unterdevon (?). Figur 3 bis 6.

Als †Carpoidea, speziell als Carp. heterostelea, faßte Jaekel eine kleine Zahl höchst eigenartig gebauter, früher als †Anomalocystidae H. Woodw. ohne weiteres den †Cystoideen zugerechneter, altpaläozoischer, gestielter Pelmatozoen zusammen, bei welchen statt pentamerer Symmetrie Zweiseitigkeit der Theka, zum Teil auch ± ausgesprochene Bilateralsymmetrie ausgeprägt ist.

Bei den meisten ist die flach beutelförmige, auch vierseitige bis gezipfelte und „stiefelförmige“ Theka — von höchstens 5 cm größtem Durchmesser — so zweiseitig gebaut, daß die polygonalen, dichten, nur hin und wieder mit „Spannleisten“ versehenen Täfelchen auf der einen flacheren bis konkaven Seite weniger zahlreich und regelmäßiger angeordnet sind, als auf der gewölbteren Seite. Die beiden Seiten werden öfters von einem Rahmen massiverer, meist auch größerer Randtafeln umgrenzt (z. B. †Trochocystis, †Cothurnocystis, †Mitrocystis), oder es können auch nur einzelne Tafeln der Randregion massiver ausgebildet sein (†Ceratocystis). Dem einen Thekaende sitzt ein, proximal ± weiter, distal schlank auslaufender, hohler Stiel an, welcher von alternierend zweizeilig, proximal zum Teil auch von irregulär mehrzeilig angeordneten Täfelchen gebildet wird. An Stielen von †Ceratocystis und einer verwandten (?) Form aus dem Mittelkambrium Böhmens meine ich zum Teil kurze seitliche Fortsätze, wie bei †Mitrocystis, zu sehen; und Jaekel sah bei †Rhipidocystis an dem wechselzeiligen Stiel flache, komprimierte, mehrtäfelige Säckchen serial angeordnet und am distalen Ende dünnwandige Blasen, welche die sonst nicht beobachteten Wurzeln ersetzen sollen. Der Stielansatzstelle gegen-

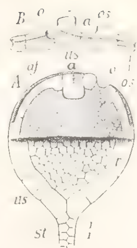


Fig. 3 A, B. †Trochocystis bohemica Barr. Mittelkambrium: Tejrovic, Böhmen. A die gewölbte, kleintafelige Seite OS der Theka ist zum Teil abgedeckt, um die großtäfelige, flache Seite US zu zeigen; B Mund-Afterregion, die Wölbung der konvexen Seite OS punktiert. a a_1 Afterlücke; af Ambulakralrinnen; i „Analklappe“ Jaekel [zweifelhaft]; r massivere Randtafeln; st proximaler Stielteil. Nach Jaekel. Abgeändert aus Steinmann.

über ist hin und wieder eine quere (?) Mundöffnung nachgewiesen resp. anzunehmen, von welcher auf den Randtafeln (z. B. bei †Trochocystis, †Placocystis) 2 Rinnen für die Ambulakralstämme ausgehen. Arme oder armförmige Anhänge als Träger freier Fortsätze der Ambulakralstämme sind selten beobachtet: bei †Placocystis 2 ungegliederte, schlanke (bewegliche?) Hörner, bei †Dendrocystis ein 4zeilig getäfelter armartiger Fortsatz. Die Lage des öfters von kleinen Täfelchen überdeckten Afters ist eine sehr verschiedene: randlich nahe dem Munde (†Trochocystis, †Mitrocystis) oder seitlich weiter nach hinten (†Dendrocystis), seltener vielleicht auch auf der Mitte der gewölbten Seite (†Placocystis).

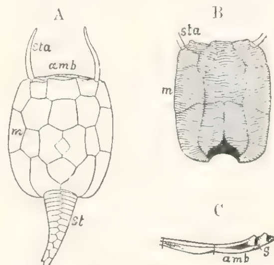


Fig. 4 A, B, C. †Placocystis Forbesi de Kon. Obersilur; Dudley, England. A gewölbte, B konkave Seite (mit wellig gerunzelten Tafeln), C Teil der Oralseite. amb Ambulakralrinnen, m Randtafeln, st Stiel, sta Stacheln, bei g mit der Theka gelenkend. Nach Jaekel und H. Woodward. Aus v. Stromer.

Bei †Cothurnocystis[1]) weist Bather den After dem Stielansatz gegenüber am Vorderende des Schaftteils der kurz-stiefelförmigen Theka nach; hier ist außerdem keine [illegible]

[1]) Aehnlich auch bei †Ceratocystis.

Mundöffnung vorhanden, sondern auf der Oberseite zieht sich, etwa diagonal dem After gegenüber, nahe dem Randrahmen der Theka eine Bogenreihe kleiner Oeffnungen hin, von deren jeder ein ganz kurzer, von kleinsten Plättchen

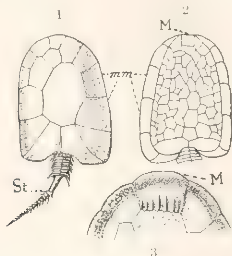


Fig. 5, 1—3. †Mitrocystis mitra Barr. Untersilur; Vosek, Böhmen. 1 konkave, 2 konvexe Seite, 3 Vorderteil der konvexen Seite von innen. m Randtafeln, M geriefte adorale [?] Platte, st Stiel. Nach Barrande. Aus Bather.

bedeckter Schlitz (? Rinne, ? Ambulakralrinne) gegen den Außenrand strahlt.

Die Lage eines Gonoporus und eines Madreporiten ist kaum sicher festzustellen.

Bei den ± stark zusammengedrückten, deutlich zweiseitigen Formen wird verschieden von einer „dorsalen", unteren, flacheren und einer „ventralen", oberen, gewölbteren Seite (z. B. von Jaekel) gesprochen, oder auch von einer „rechten" und „linken" Seite; diese Orientierungen sind ± unsicher.

Ueber die Lebensweise der †Carpoideen läßt sich nichts absolut Sicheres sagen. Haeckel meinte, daß die (von oben nach unten) zusammengedrückten Formen mit Hilfe des Stieles freibeweglich gewesen seien. Ob diese Annahme jene glatte Ablehnung verdient, welche ihr Jaekel zuteil werden läßt, ist mindestens sehr fraglich. Jedenfalls läßt sich aus der Körperform darauf schließen, daß die Tiere dem Boden ± aufliegend gelebt haben; wenigstens scheint eine solche Orientierung des Körpers bei seiner Zweiseitigkeit verständlicher als ± aufrechte Stellung auf dem sehr schwanken, distal meist wohl auch sehr schwachen Stiel. Dabei wäre es mit dem Bau des Stieles durchaus vereinbar, daß etwa schlagende Bewegungen des „Stieles" die Körper vorwärts zu bewegen vermochten.

Die Beziehungen der †Carpoideen zu anderen Pelmatozoen sind sehr unsichere. Mit den echten †Cystoideen, den Diploporiten und Dichoporiten, können sie nach ihrem dichten Thekaltafeln kaum engere Gemeinschaft haben. Aber auch den †Edrioasteroideen und †Blastoideen stehen sie durchaus fern. Wenn Pentamerie eine ursprüngliche Grundeigenschaft der Pelmatozoen überhaupt genannt werden dürfte, dann wäre es wohl richtig, die †Carpoideen mit Jaekel (1900) als aberrante, irreguläre Pelmatozoen zu bezeichnen. Das Verhältnis von Stiel zu Theka zeigt in der Täfelung des Stieles und in seiner bei manchen Formen erheblichen proximalen Erweiterung eben diesen Stiel so deutlich als eine Art von Ausschnürung der Theka, daß hierin (wie ähnlich übrigens auch in dem Stiel des Crinoiden †Botryocrinus) ein eigentlich primitives Verhältnis gegeben ist. Danach, wie auch nach ihrem ersten bekannt gewordenen Auftreten im mittleren Kambrium müssen die †Carpoideen eine sehr frühe Abzweigung vom Pelmatozoenstamm bedeuten, dessen geologisch-zeitliche „Urform" uns unbekannt ist. In der Reduktion (handelt es sich hier in der Tat um Reduktion?) der Ambulakralstämme auf 2 (oder gar 1 bei †Dendrocystites) ist



Fig. 6. †Dendrocystis Sedgwicki Barr. Untersilur; Böhmen. As Afterregion; Br vierzeilige Brachiole, links vergrößert (schlecht); St Stiel — in Wirklichkeit mehr als doppelt so lang und abgesehen von dem vieltäfeligen Proximalteil alternierend zweizeilig gebaut. Die hier und bei †D. Barrandei vorhandene „antibrachiale" Ausstülpung der Theka, vorne oben, gegenüber der Brachiole ist nicht sichtbar. Nach Barrande. Aus Bather.

wohl lediglich Homöomorphie mit manchen †Cystoideen (z. B. †Pleurocystis) ausgesprochen, bei denen übrigens auch Zweiseitigkeit der Theka und weit rückwärtige Lage des Anus vorkommt, ohne daß dabei sich nähere morphologische Verwandtschaft mit den †Carpoideen konstruieren ließe.

Seit dem Mittelkambrium (Böhmen und Westeuropa) sind echte Carpoideen (Heterostelea) bekannt: der rundlich sackförmige †Trochocystis Barr. mit einem Mosaik sehr zahlreicher kleinerer Täfelchen auf der „Ventral"- und etwas größerer auf der „Dorsal"seite und mit besonders massiven leistenförmigen Randtafeln; †Ceratocystis Jaek. mit 4- bis 5 zipfeliger stiefelförmiger Theka (3 gröbere Tafeln in den Zipfeln der weiteren Umrahmung des Stielaustrittes). †Cothurnocystis Bath. (Untersilur Schottland) hat an den Randtafeln nach unten gerichtete Zapfen. Die ovalen Theken von †Anomalocystis Barr. (Mittelkambrium, Untersilur) und †Placocystis de Kon. (Obersilur — Unterdevon) sind durch relativ geringe Zahl größerer Tafeln mit besonders großen Randtafeln ausgezeichnet; bei letzterer Form ist die Täfelung der „Ventral"seite nahezu vollkommen bilateral symmetrisch, und die zentrale Rhombenplatte dieser Seite wird auch als der Lage des Afters entsprechend gedeutet. †Rhipidocystis Jaek. (Untersilur) ist durch blasenförmige Anhänge am Stiel ausgezeichnet (teils Taschen für Generationsorgane?, teils Ersatz für Wurzeln?), und die beutelförmige, vieltäfelige Theka von †Dendrocystis Barr. (Untersilur) fällt durch den Besitz eines recht langen Stieles, auf in den sie ausgezogen ist, und durch den einen armartigen Anhang am entgegengesetzten Körperende, welches außerdem noch einen schlauchartigen „antibrachialen" Fortsatz tragen kann.

Zu seinen Carpoideen zog Jaekel als Eustelea auch die untersilurischen †Malocystidae Bather (Nordamerika): Formen, deren Stiel, wie der der allermeisten †Cystoideen und Crinoideen, aus einfachen Ring- oder Scheibengliedern besteht, und deren ± kugelige Theka aus zahlreichen, regelmäßigeren Täfelchen zusammengesetzt ist. Von der Mundöffnung ziehen die Ambulakralstämme über die Theka in zwei einfachen Radien, deren verzweigte Ausläufer frei erhoben sind (†Malocystis Bill.), oder deren zwei Ambulakralrinnen linksseitig kleine Pinnuletten abgeben (†Amygdalocystis Bill., †Canadocystis Jaek.). Auch †Comarocystis Bill. (Untersilur) mit 2×2 freien, einzeiligen Armen nennt Jaekel eustel. Obwohl Porensysteme in den Kelchtafeln dieser Formen fehlen, stehen sie den Cystoideen doch wohl erheblich näher als den heterostelen Carpoideen — trotz der zweizähligen Ambulakra. Auch die kugeligen, aus 3 Zyklen dicker, dichter Tafeln zusammengesetzten Kelche des untersilurischen †Cryptocrinus v. Buch mit fünfzähligen, kurzen, dichotom gegabelten Ambulakren, sind wohl auch den Cystoideen (etwa als „Aporita", F. Römer) näherzustellen, denn als †Carpoideen zu bezeichnen, denen sie Zittel (Grundzüge der Paläontologie) anschließt.

3. Klasse. †Cystoidea v. Buch (e. p.) (Cystoidea vera, Hydrophoroidea Jaekel). Mittelkambrium bis Unterdevon Figur 7 bis 20.

Nach Ausschluß der †Edrioasteroideen, †Carpoideen (und †Blastoideen) aus der alten v. Buchschen Klasse der Cystoideen bleibt bei immerhin unsicherer Stellung solcher Formen wie der „eustelen" Carpoideen (s. oben) der †Steganoblastiden (siehe †Edriosteroidea S. 459) und des parablastiden †Asteroblastus (S. 471) eine erhebliche Anzahl paläozoischer Pelmatozoen übrig, welche als Cystoidea vera oder Hydrophoroidea vereinigt werden. Bei sehr mannigfacher Gestalt und manchen Organisationsdifferenzen vereinigt sie alle ein Charakter: der Besitz besonderer Porensysteme in allen oder auch nur einzelnen Kelchtäfelchen.

Die kugelige oder birn- bis sackförmige selten mehr als 5 cm messende Theka sitzt meist einem schlanken, kurzen aus niedrigen, manchmal verschiedenartigen Ringgliedern aufgebauten Stiel auf; seltener ist sie stiellos, frei (†Lichenoides) oder mit einer basalen Region festgewachsen (†Aristocystis, †Calix). Sehr wechselnd ist die Zahl der Kelchtafeln: in großer Zahl können ± unregelmäßig polygonale Täfelchen den sackförmigen bis kugeligen Kelch aufbauen (†Echinosphaera, †Sphaeronis, †Glyptosphaera, †Aristocystis) oder weniger zahlreiche, größere, regelmäßigere, meist sechsseitige Tafeln, die in 2, 3, 4, 5 Kränzen[1]) angeordnet sein können, setzen ihn zusammen (†Lichenoides, †Caryocrinus u. a.). Auch hier kann (seltener) Zweiseitigkeit hervorgerufen werden durch verschiedenartige Täfelung z. B. einer „Vorder"- und „Rücken"seite wie bei †Pleurocystis (Formgleichheit mit manchen †Carpoideen!). Schärfer ausgeprägte Pentamerie ist selten zu beobachten (†Macrocystellidae, †Proteroblastus).

Charakteristisch ist für die manchmal recht dicken Kelchtafeln (†Aristocystis) die Struktur. Bei zahlreichen Gattungen ist eine äußere, dichte, dünne Epidermis (†Echinosphaera †Glyptosphaera †Aristocystis) über einer dickeren inneren Skelettschicht (Barrandes „enveloppe principale calcaire, Jaekels „Stereothek") erkennbar. Diese letztere ist durch Porensysteme ausgezeichnet. Teils sind die Poren ± vertikale, gerade, einfache, seltener geteilte

[1]) Die Zählung der Kelchtafeln wird von verschiedenen Autoren verschieden vorgenommen.



Fig. 7. Fig. 8.

Fig. 7, 8. Porensysteme der Cystoideentafeln.

Fig. 7, A bis K. †Dichoporita (†Rhombifera). A Querschnitt parallel zur Tafelnaht durch die Porenfalten (= Schlitze) (Tafelrinnen Jaekels) von †Lichenoides; B Porenrauten von †Stichocystis (†Caryocystis) geometrica Ang.; je ein Dichoporus liegt in einem erhöhten Wall; die Porenfalte ist bis auf eine Anzahl kleiner Poren, k geschlossen; C und D Aufsicht und Längsschnitt durch einen Dichoporus von †Caryocystis, die Reihe der kleinen aufsteigenden Poren zeigend; E Querschnitt durch einen Teil einer Porenraute von †Caryocystis; F Porenrauten von †Caryocystis mit sichtbaren Porengängen; G Längsschnitt durch einen großen, teils überbrückten Dichoporus (Poren- oder Rautenbrücke); H Porenraute mit offenen Porenschlitzen (S) von †Chirocrinus; J dieselbe im Querschnitt; K Querschnitt durch 2, durch einen absteigenden „Porenkanal" zusammengefaßte „Porengänge" von †Echinosphaera.

Fig. 8, A bis D. †Diploporita. A Kelchtafeln von †Glyptosphaera Leuchtenbergi Ang.; durch die eingezeichneten Linien l soll die Anordnung der Doppelporen zu Rauten angedeutet werden; B umwallte Doppelpore von †Mesocystis; Außenansicht; C Schnitt durch eine Doppelpore; D Tafel von †Protocrinus, zum Teil sind 3 Poren durch einen Wall zusammengefaßt. f Porenfalte, g Porengang, h Porenhof, k Porenkanal, l Rautengrenze, n Tafelgrenze, r, s Porenschlitz, w Porenwall, x Doppelpore auf 2 benachbarten Tafeln. Nach Jaekel. Aus Steinmann.

Röhrchen, welche nach innen und außen in einfachen oder doppelten, rundlichen Poren austreten und entweder blind unter der Epidermis endigen oder sie durchbohren. Die äußeren Austritte (z. T. auch die inneren) je zweier benachbarter Röhrchen sind durch gerade, seltener gekrümmte, subepidermale „Porengänge" verbunden, oder ein umwalltes, meist ± elliptisches Grübchen umfaßt je 2 (auch 3) zu „Diploporen", welche bald mehr, bald weniger dicht, unregelmäßig über die Kelchtafeln verstreut sind (†Diploporita). Bei zahlreichen Typen finden sich „Dichoporen" in der Anordnung von „Porenrauten": Je 2 Poren, d. h. die Skelettwand ± durchsetzende, nach außen offene, oder von der Epidermis bedeckte und dann nach innen geöffnete Röhrchen, sind durch horizontale, in die Stereothek eingebettete Kanäle, „Porenfalten" verbunden, d. s. öfters nach innen-unten nur durch eine ganz dünne Wand abgegrenzte, oder auch wandlose Rinnen, welche seltener oben offen sind („Porenschlitze" z. B. bei †Chirocrinus, †Lichenoides). Meist sind sie zum größten Teil oder auch ganz von der Plattensubstanz überbrückt („Porengänge" bei †Echinosphaera), oder hier auch durch eine Reihe kurzer aufsteigender Kanälchen ersetzt („Reihenporen" bei †Caryocystis). Die beiden Endporen eines Dichoporus liegen stets auf benachbarten Tafeln, und die Dichoporen sind so zu rhombisch umgrenzten Systemen „Porenrauten" angeordnet, daß sie in den Spannungsrichtungen der Tafeln liegen, und daß die Naht zwischen 2 Tafeln mit der einen Diagonale der Raute zusammenfällt. Solche Porenrauten finden sich entweder auf allen Kelchtafeln, oder sie sind auf einzelne beschränkt (z. B. †Scolicystidae, †Pleurocystidae); bei einzelnen Formen (†Callocystidae) kommen auch — auf benachbarten Tafeln liegend — oberflächlich getrennte Rautenhälften („pectinated rhombes") vor. Frei von Porenrauten sind wohl die Regionen der Kelchwand, an deren Innenseite der Darm unmittelbar anlag.

Die Deutung dieser Porensysteme (Billings nannte sie Hydrospiren, Jaekel Hydrophoren) ist, da mehrfach ihre Bedeckung durch eine dichte Epidermis nachgewiesen ist (besonders deutlich bei †Echinosphaera), recht unsicher. Sie werden, wie die Poren in der Kelchdecke mancher Crinoideen, als Zufuhrgänge für Wasser in die Leibeshöhle gedeutet, auch als der Respiration dienend, wohl auch mit den Hydrospiren der †Blastoideen verglichen.

Im Scheitel des Kelches liegt zentral die meist von Täfelchen in verschiedener Anordnung bedeckte Mundöffnung. Exzentrisch, verschieden weit vom Munde entfernt liegt die ziemlich große, von einer Täfelchenpyramide oder sonst unregelmäßiger gelagerten Täfelchen bedeckte Afteröffnung, zu der ein rechtsgedrehter Darm führt, dessen Spuren Jaekel nachweisen konnte.

Eine kleinere Oeffnung zwischen beiden wird als Genitalöffnung angesprochen; dazu kann, wie bei †Aristocystis noch eine vierte, ± geschlitzte Oeffnung näher am Munde treten, ein „Madreporit", die Zufuhröffnung zum Steinkanal (?).

Die, durch ein periorales Ringgefäß zusammengefaßten Ambulakralstämme liegen in vom Munde ausstrahlenden 2—5 Ambulakralrinnen, deren Ausgangszahl 3 gewesen sein dürfte; bei †Aristocystis fehlen die Ambulakralrinnen, und bei †Caryocrinus sind sie, wie der Mund, meist durch kräftigere Decktäfelchen vollkommen verdeckt. Bei †Echinosphaera, †Sphaeronis stellen sie nur kurze Ausstülpungen am Mundrande dar. Bei anderen verlaufen sie als lange, einfache, seltener verschieden verzweigte Rinnen (†Proteroblastus; — †Glyptosphaera, †Callocystis) über die äußere Kelchwand. Dabei lagern sie auf 1 oder 2 Reihen besonderer Täfelchen und können von seitlichen Saumplättchen und Deckplättchen begleitet und bedeckt sein. Des öfteren sind die Ambulakra in freie, unverzweigte, zweizeilige Aermchen (Brachiolen) fortgesetzt, deren Zahl zwischen 2 und 13 oder mehr schwankt; oder an den Seiten der auf der Kelchwand hinziehenden Ambulakralrinnen, auch an den Enden ihrer Verzweigungen erheben sich auf besonderen Gelenkfazetten schlanke, zarte „Pinnuletten".

Nach den Porensystemen der Kelchtafeln lassen sich die Cystoideen in 2 Ordnungen scheiden: 1. †Dichoporita Jaekel (†Rhombifera v. Zittel): Alle oder nur einzelne Thekaltafeln besitzen Porenrauten; 2. Diploporita Jaekel: Die Thekalplatten sind von Doppelporen durchsetzt.

Die etwaigen genetischen Beziehungen dieser beiden Ordnungen sind unsicher. Nach dem bis jetzt von ihnen Bekannten treten die ersten Dichoporita wohl bereits im mittleren Kambrium auf: †Lichenoides Barr., Böhmen. Jaekel scheidet allerdings diesen ungestielten, ziemlich regelmäßig gebauten Typus, an dessen Kelch nur 2 Kränze größerer, sechsseitiger Tafeln auftreten, von den Cystoideen überhaupt aus, da in den Kelchtafeln keine Porensysteme vorhanden sein sollen, sondern solche nur durch radialgerichtete wellblechartige Fältelungen der Tafelränder vorgetäuscht würden. Doch — die nur in Steinkernen und Abdrücken vorliegenden Reste von †Lichenoides lassen die Annahme von Porenrauten durchaus zu: Die nach außen offenen Porenfalten oder Schlitze sind nach innen (unten) von einer dünnen Wand umgeben. Zweifellose †Dichoporita sind sonst seit dem tiefsten Untersilur des Baltikums (Glaukonitsand der russischen Ostseeprovinzen und dessen Aequivalente in Schweden) bekannt: †Chirocrinus Eichw. Echte †Diploporita kennt man seit dem allerjüngsten Kambrium (Tremadoc, Stufe $Dd_{1\beta}$ Barrandes): †Archegocystis Jaek., †Glyptosphaera J. Müll. Dabei sind die ältesten Typen beider Ordnungen voneinander morphologisch so scharf getrennt, daß weder das Werden der einen aus der anderen noch beider aus einer gemeinsamen Wurzel sicher gestellt werden kann.

1. Ordnung †Dichoporita Jaek. (Rhombifera v. Zittel). Nach der Anordnung, der Zahl und der Besetzung der Kelchtafeln mit Porenrauten faßt Jaekel die hier vereinigten Familien als 2 verschiedenen Sektionen angehörend auf: als Regularia und Irregularia. Den Regularia wohnt keineswegs etwa auch nur vorwaltende Pentamerie inne; ihre Regelmäßigkeit bezieht sich vielmehr lediglich darauf, daß der Bau der meist wenig täfeligen Theka durch normal 3 oder 4 über einem basalen, meist vierteiligen Kranze liegende laterale Kränze bestimmt wird, die normal aus je fünf Tafeln bestehen. Dabei kann die äußere Form sehr weit von jeder Regelmäßigkeit abweichen, wie das z. B. bei †Pleurocystis der Fall ist, wo der Kelch durch die Entwickelung eines sehr großen vieltäfeligen „Analfeldes" zweiseitig wie bei manchen †Carpoideen geworden ist. Auch in der Ausbildung der Ambulakra, deren Zahl zwischen 2 und 5 wechselt, ist keine „Regelmäßigkeit" zu erkennen. Vereint werden die Regularia durch ihre Porenrauten: diese kommen nur auf einzelnen Kelchtafeln vor, können bei manchen als Halbrauten ausgebildet sein und besitzen nach außen offene Poren.

Hierher gehört wohl die mittelkambrische, ungestielte Gattung †Lichenoides Barr. aus Böhmen. Ferner dann die Familien der †Chirocrinidae, †Cystoblastidae, †Pleurocystidae, †Scoliocystidae, †Echinoencrinidae und †Callocystidae.

Die untersilurischen †Chirocrinidae zeigen in ihrer Theka über 4 basalen Tafeln 3 Kränze von je 5 lateralen Tafeln; der ganze Kelch ist äußerlich ziemlich regelmäßig pentamer, mit zahlreichen, unregelmäßig verteilten Porenrauten. Die 5 kurzen Ambulacra sind ± vergabelt und gehen in kurze Brachiolen aus. Die Afteröffnung sitzt seitlich auf der Kelchwand. Der Stiel ist distal zu einer blasigen vieltäfeligen Wurzel erweitert. †Chirocrinus Eichw., Untersilur.

Den †Chirocrinidae stehen morphologisch nahe die †Scoliocystidae (Silur), deren ± birnförmige Theka aus 4 Kränzen meist radial skulpturierter Täfelchen besteht, die meist nur 3 Porenrauten besitzen. Im

Scheitel stehen um den Mund 5 bis 10 und mehr feine Brachiolen. Der After ist weit abwärts gerückt; zwischen ihm und dem Munde liegt ein Genitalporus. †Echinoencrinus v. M.; †Erinocystis Jaek. Untersilur; †Scoliocystis Jaek. Untersilur; †Prunocystis Forb., †Schizocystis Jaek. Obersilur.

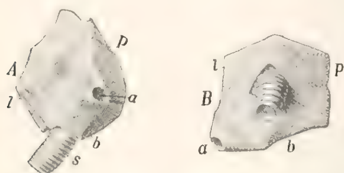


Fig. 9 A, B. †Scoliocystidae. A †Echinoencrinus Senckenbergi H. v. M. Seitenansicht; B †Erinocystis Volborthi Jaek., von der Basis. Beide Untersilur. St. Petersburg (a a_1 After; b basale, l laterale Tafeln; p Porenrauten; s Stiel). Nach Jaekel. Aus v. Zittel.

Die †Pleurocystidae (†Pleurocystis Bill. Untersilur) fallen durch ihren zweiseitigen Bau auf: gegenüber dem vieltäfeligen Analfelde mit ganz weit hinten liegendem After ist die Antanalseite von 4 Querreihen größerer Tafeln zusammen-

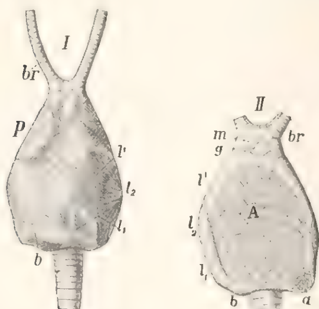


Fig. 10. †Pleurocystis filitexta Bill. Untersilur; Kanada. I Vorder-Antanalseite; II Analseite (a After; A Analfeld; b Basalia; br Brachiolen; g Genitalporus; l Lateraltafeln; m Madreporit; P Porenrauten). Nach Jaekel. Aus v. Zittel.

gesetzt, auf denen eine basale und zwei obere Porenrauten vorhanden sind. Der Mund ist von zwei kräftigen Brachiolen begleitet.

Die ± melonenförmige Theka der †Callocystidae ist aus 3 bis 4 Kränzen größerer Täfelchen zusammengesetzt und zeigt 3 bis 5 aus getrennten Hälften bestehende Porenrauten. Die langen Ambulakra gehen von dem scheitelständigen Munde weit über den Kelch, sie sind in der Zahl von 2 bis 5 vorhanden, meist einfach, seltener gegabelt, von kräftigen Saumplatten begleitet und mit zierlichen Pinnulae besetzt †Callocystis Hall, †Glyptocystis Bill., †Lepadocrinus Hall., †Pseudocrinites Pearce; Silur

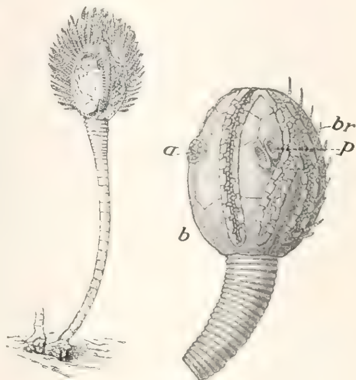


Fig. 11, 12. †Callocystidae.
Fig. 11. †Lepadocrinus (†Apiocystis) quadrifasciatus Pearce sp. Obersilur; Dudley, England. Restauration; im linken Interambulakrum oben der After, im rechten 2 Halbrauten (pectinated rhombs). Aus Bather.
Fig. 12. †Callocystis Jewetti Hall. Obersilur; Lockport, N. Y. a After, b Basalia, br Brachiolen, p Porenraute (pectinated rhombs). Nach Jaekel und Schuchert. Aus v. Zittel.

Der äußerlich und durch seine Ambulakra regelmäßigst pentamere Typ der Dichoporita ist in den †Cystoblastidae (†Cystoblastus Volb., Untersilur) gegeben. Die fast

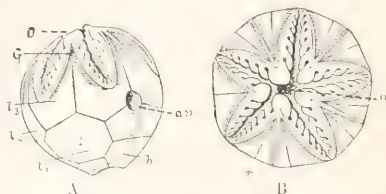


Fig. 13 A, B. †Cystoblastus Leuchtenbergi Volb. Untersilur; St. Petersburg. A lateral, B oral. an After, b Basalia, l_{1-3} Lateralia, g Genitalporus, o Mund; in B zeigt * die Lage des Afters an.

kugelige Theka zeigt über 4 basalen Tafeln 3 Kränze von 5,5 und 5 bis 4 lateralen großen Tafeln, zu denen aber noch 3 deltoidische Tafeln kommen. Die großen Ambulakra, in ihrer äußeren Form an die der †Blastoidea erinnernd, greifen in lanzettlichen Einschnitten tief in die oberen Lateraltafeln ein; die kurzen Seitenrinnchen der Ambulakralfurche waren mit feinen Pinnuletten bestanden. Die Ränder der Ambulakra sind von halben Porenrauten, richtiger von Schlitzreihen eingefaßt, denen in den interambulakralen Tafeln gleiche Schlitzstreifen mit horizontal gestellten Schlitzen entsprechen. Sonst sind noch zwei basale Porenrauten bekannt. Der After liegt seitlich in der Grenze des zweiten und dritten Lateralkranzes.

Von den Jaekelschen Irregularia ist bei weitem am bekanntesten der Typus der †Echinosphaeridae (†Echinosphaera Wahlbg., †Caryocystis v. Buch, †Amorphocystis Jaek. Untersilur).

Der kugelige bis schlauchförmige Kelch ist aus vielen unregelmäßig polygonalen Täfelchen zusammengesetzt, die alle unter einer dichten Deckschicht Porenrauten tragen. Die den Mund umgebenden 2 bis 5 Ambulacra sind kurz, laufen in Brachiolen aus. Der After ist von einer Täfelchenpyramide bedeckt, zwischen ihm und dem Munde seitlich ein Genitalporus; ein Madreporit ist nicht nachgewiesen. Die kurzgestielte kugelige, glatte †Echinosphaera aurantium His. sp., die häufigste Cystoideenart, ist im tieferen Untersilur des Baltikums, in den Echinosphaeritenkalken, häufig. Bei †Caryocystis liegen die Porenfalten in erhöhten Leisten.

Bei den silurischen †Caryocrinidae ist der ± regelmäßige, knospenförmige Kelch über einer meist viertäfeligen Basis aus zwei Kränzen größerer lateraler und einem Kranze von Scheiteltafeln zusammengesetzt; in jedem dieser Kränze kommen mehr als 5 (6 bis 8 und 9) Tafeln vor. Alle seitlichen ± radial skulpturierten Kelchtafeln tragen Porenrauten, deren endständige Poren von siebförmig durchbohrten „Porenhügeln" bedeckt sind, die in radialen Reihen (†Corylocrinus v. Koen. Untersilur, †Caryocrinus Say, Obersilur) oder in Gruppen (zum Teil bei †Hemicosmites v. Buch, Untersilur) geordnet sind. 3 kurze (†Hemicosmites), einfache oder distal vergabelte Ambulakra, die von Saumtafeln bedeckt sind, gehen in 3 bis 13 freie, feine Brachiolen über, welche den Scheiteltafeln oder auch dem Rande der oberen Lateraltafeln aufsitzen. Der After liegt in der Scheiteldecke (†Caryocrinus) oder seitlich (†Hemicosmites); Madreporit und Genitalporus sind nicht nachgewiesen.

Die Organisation der vierzählig symmetrischen Jaekelschen †Tetracystidae mit der untersilurischen Gattung †Rhombifera Barr., dem seltenen, †Tiaracrinus Schultze aus dem Devon, bei denen ebenfalls Porenrauten vorkommen, ist ungenügend bekannt.

2. Ordnung †Diploporita Jaekel. Wesentlich nach dem Bau und der Zahl der Ambulakra sind unter den mit Doppelporen auf den Kelchtafeln versehenen †Diploporita eine Zahl besonderer Familien zu unterscheiden.

Bei den sack- bis birnförmigen, ungestielten,

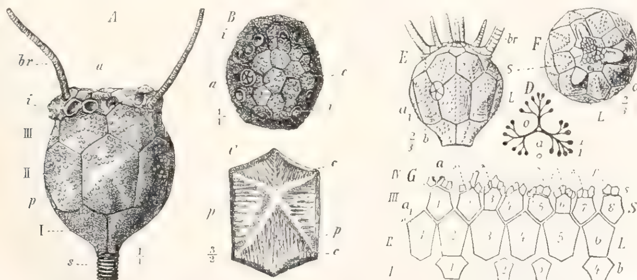


Fig. 14 A bis G. †Caryocrinidae. A D †Caryocrinus ornatus Say. Obersilur; Lockport, N. Y. A Lateralansicht, B Kelchdecke mit zentraler Scheitelplatte (e), C laterale Kelchtafel von innen, D Verlauf der Ambulakra unter der Decke („hydrophores palmées" Barr.) E, F †Hemicosmites pyriformis v. Bach. Untersilur; russische Ostseeprovinzen. G Kelchanalysen von †Caryocrinus und †Hemicosmites (punktiert die Grenzen der bei †Hemicosmites anderen Tafeln). I, b_{1-4} Basalia (Infrabasalia Bath.), II L_{1-6} erster Lateralkranz (Basalia Bath.), III S_{1-8} zweiter Lateralkranz (Radialia Bath.), s Decktäfelchen (Tegminalia Bath.) mit (zum Teil punktierten) Facetten für die Brachiolen. a After bei Caryocr., a_1 bei Hemicosm.; br Brachiolen; c Innenfalten der Rautenporen p; i Ansatzstellen der Brachiolen; o Mund, o_1 Munddeckplättchen. Aus Steinmann.

festgewachsenen †Aristocystidae sind in der unmittelbaren Umrahmung des Mundes feine Brachiolen stehend. †Aristocystis Barr. (Untersilur) mit 2 angedeuteten Brachiolen ist durch besonders massive unregelmäßig polygonale Kelchtafeln ausge-

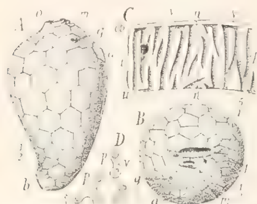


Fig. 15 A bis D. †Aristocystidae. A—C †Aristocystis bohemica Barr. Untersilur; Böhmen. A lateral, B oral, C Schnitt durch die Theka mit Poren. D †Trematocystis Jaek. Obersilur, Poren von außen. a After; b dicktäfelige Anhaftstelle; f Ansatzstelle für Brachiolen; g Genitalporus; i mittlere Schalenlage, Stereothek, Mesostereom; m Madreporit; n Tafelnaht; o Mund; ob Epidermis, Epistereom; p Poren; u untere Schalenlage, Hypostereom; v Porengänge. Aus Steinmann.

zeichnet; †Trematocystis Jaek. (Obersilur) hat 4 Brachiolen. Zwischen Mund und After sind hier Madreporit und Genitalporus beobachtet worden. Hierher wohl auch die, auch als Schwamm gedeutete, †Lodanella E. Kays. (Unterdevon).

Die ebenfalls ungestielten, mit kleiner Basis aufgewachsenen, ± kugeligen bis birnförmigen †Sphaeronidae Jaek. besitzen 5 kurze Ambulakralrinnen, welche in geringer Distanz vom Munde ein- oder mehrfach gegabelt sind (Hydrophores palmées Barrandes) und in feine Brachiolen ausgehen. After und Genitalporus liegen nahe dem Munde in der Scheitelregion. †Archegocystis Jaek. †Sphaeronis His. Untersilur; †Proteocystis Barr. (= †Eucystites Ang.) Untersilur bis Unterdevon.

Fünf lange, unverzweigte Ambulakralrinnen, welche gebogen und spiral gedreht über die birnförmige in ein weites Stielrohr übergehende Theka ziehen, sind den †Gomphocystidae Jaek. eigen; dabei sind sie nur auf je der linken Seite von Pinnuletten begleitet. †Pyrocystes Barr. Untersilur; †Gomphocystis Bill. Obersilur.

Auf der ± kugeligen, sehr vieltäfeligen Theka der †Glyptosphaeridae Jaek. sind die 5 langen Ambulakra in feinen schmalen Rinnen in die Thekalplatten eingesenkt; sie sind mehrfach unregelmäßig verzweigt, an den Zweigenden erheben sich auf besonderen Gelenkflächen feine Brachiolen; der Mund ist von einer fünfseitigen Täfelchenpyramide bedeckt. Interambulakral liegt eine große Afteröffnung, zwischen ihr und dem Munde ein kleiner Genitalporus und ein geschlitzter Madreporit. †Glyptosphaeta F. Müller Untersilur.

Besonders regelmäßige Pentamerie zeigen die untersilurischen †Protocrinidae Bath. mit ellipsoidischer bis birnförmiger, vieltäfeliger Theka. Bei dem im Alter ungestielten †Protocrinus Eichn. sind die langen schmalen Ambulacralrinnen mit einzelnen, 5 bis etwa 10 Seitenästchen versehen, welche in feine Pinnuletten ausgehen. †Proteroblastus Jaek. hat lange gerade Ambulakralrinnen mit sehr zahlreichen kurzen Seitenrinnchen und mit ebenso zahlreichen Pinnuletten; hier sind übrigens nur die die Pinnuletten tragenden Täfelchen mit Doppelporen versehen.

Aus dem Untersilur Rußlands liegt in †Mesocystis Bath. (†Mesites Hoffm.) der Typus einer besonderen Familie vor, der †Mesocystidae Jaek. Der ± kugelige Kelch hat 5 lange gerade, mit besonderen

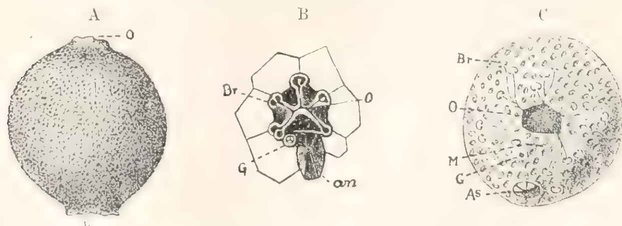


Fig. 16 A bis C. †Sphaeronidae. A, B †Sphaeronis globula Ang. Untersilur; Schweden. A lateral, B Scheitel. Vergrößert. Aus v. Zittel. C †Proteocystis flava Barr. Oralseite Unterdevon; Koneprus, Böhmen. Aus Bather. an, As After; b Anhaftsstelle; Br Gelenkfacetten für die Brachiolen (bei †Proteocystis an den Enden von „hydrophores palmées"); g Genitalporus; m Madreporit, O Mund.

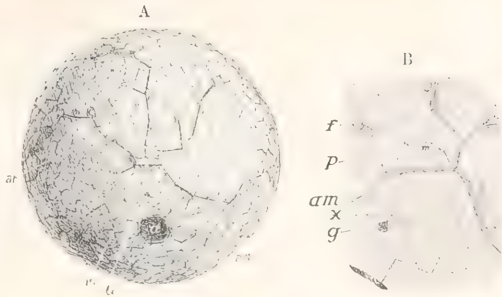


Fig. 17. A, B. †Glyptosphaera Leuchtenbergi Volb. Untersilur; St. Petersburg. A Oralseite, B Mundregion vergrößert (a After; am Ambulakralrinnen; f Facetten für Brachiolen; G, g Genitalporus; m Munddecktafeln; x Madreporit; p Diploporen). Nach Volborth, Jaekel. Aus v. Zittel.

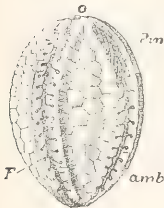
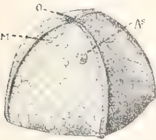


Fig. 18. †Protocrinidae. †Proteroblastus Schmidti Jaek. Untersilur; Uxnorm, Estland. amb Ambulakra; F Facetten für die Pinnulathen Pin; O Mund. Nach Jaekel. Aus v. Zittel.

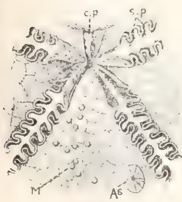
Täfelchen der Kelchwand aufgelagerte Ambulakra, deren Rinne von größeren Saum- und zahlreicheren kleinen Deckplättchen überdacht ist; alternierend strahlen kurze Seitenrinnchen aus, die von Deckplättchen belegt in feinen Pinnuletten endigen. Mit Ausnahme interradialer Oraltafeln sind alle Kelchtäfelchen mit Doppelporen versehen.

Als Formen unsicherer Stellung seien noch einige hier erwähnt. Im älteren Kambrium Amerikas und Englands werden als †Eocystis Bill. und †Protocystis Hicks unvollständige Kelchreste mit vielen unregelmäßig polygonalen Täfelchen (mit ± radialen Spannleisten) und mit 10 oder mehr zweizeitigen, dünnen Brachiolen bezeichnet, deren Beziehungen zu den †Cystoideen ganz unklar sind. †Tiaracrinus Schulze Unterdevon.

Im Tremadoc von Shropshire und Hof in Bayern kommt in †Macrocystella Call. ein Typus eines kleinwüchsigen, gestielten Pelmatozoen vor, der — wahrscheinlich mit †Mimocystis Barr. aus dem Untersilur Böhmens übereinstimmend — meist zu den Cystoideen







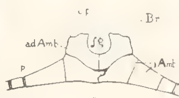


Fig. 19. †Mesocystidae. 1 bis 4 †Mesocystis Pusirewskii Hoffm. sp. Untersilur; St. Petersburg. 1 Rekonstruktion der Theka, 2 der Oralregion, 3 eines Ambulakrums, 4 Querschnitt durch ein Ambulakrum. ad Amb Adambulakralplatten; As After; Br Brachiolen und Facetten für sie; cp Deckplättchen; fg Ambulakralrinne; iAmb interradiale Kelchtafeln; M Perforationen (nicht die hier unregelmäßig verstreut liegenden, umwallten Doppelporen); sp Saumplättchen. 1 u. 2 nach Hoffmann und Nikitin, 3, 4 nach Jaekel. Aus Bather.



Fig. 20. †Macrocystella Mariae Call. Tremadoc; Skropshire. 1 Rekonstruktion; 2 Arm lateral, 3 dorsal, 4 ventral mit Saumplättchen; 5 Kelchtafel mit radialen Leisten und Rinnen (? Porenschlitzen). Aus Bather.

gezählt wird, obwohl auf den Kelchtafeln keine Porensysteme — nur Leistenrhomben — erkennbar sind. Jaekel rechnet ihn ebenso wie den oben genannten †Lichenoides zu den Crinoideen, aber für diese passen die 4 Täfelchenkränze des Kelches nicht — man erhielte eine aus 3 Kränzen bestehende Basis.

Hier sei noch an die †Malocystidae, †Comarocystis sowie aus †Cryptocrinus erinnert — s. S. 61 —, die teils als †Carpoideen aufgefaßt werden (Jaekel, Zittel), teils als „Aporita" den †Cystoideen zugerechnet werden (F. Römer, Bather).

Die Blütezeit der Cystoideen ist das Untersilur, wo sie im Baltikum besonders zahlreich sind, doch auch aus Böhmen, Wales, Nordamerika und neuerdings auch aus Burma ist eine erkleckliche Zahl von Cystoideen bekannt geworden. Nur vereinzelte Arten sind häufigere Erscheinungen, wie die von †Echinosphaera, †Hemicosmites, †Caryocrinus im Untersilur besonders baltischer Gebiete; †Aristocystis im Untersilur, †Proteocystis im Devon Böhmens.

(Ueber die phylogenetische Bedeutung der †Cystoidea s. den Schluß des Artikels).

4. Klasse †Blastoidea Say. Untersilur bis Karbon. Figur 21 bis 29.

Der pentamere Bau ist unter den Pelmatozoen am weitaus regelmäßigsten den nur verhältnismäßig wenige Gattungen umfassenden, paläozoischen †Blastoidea oder Knospenstrahlern eigen, wenigstens sind hier nur selten gröbere Abweichungen von der regelmäßigen Pentamerie festzustellen.

Der meist kleine, zierliche Kelch von Melonen- oder Knospenform, sitzt gewöhnlich einem feinen, kurzgliedrigen, schlanken und in der Regel zirrenlosen Stiele auf. Im wesentlichen bauen drei übereinanderliegende Kränze von zusammen gewöhnlich 13, unbeweglich an glatten Nähten aneinanderstoßenden, kräftigen Tafeln den Kelch auf. Drei Täfelchen bilden die Basis: eine kleinere von Rhombenform; zwei größere — offenbar aus der Verwachsung von je zwei rhombischen hervorgegangene — Täfelchen haben ± fünfseitigen Umriß. Darüber stehen fünf größere, höhere, als Gabelstücke bezeichnete Radialia, in deren jedes ein — bei verschiedenen Gattungen verschieden tiefer und breiter — Einschnitt von oben her eingreift. Alternierend, interradial, folgen zuoberst fünf meist kleinere, ± rhomboidische Deltoidea; sie bilden zum Teil die Kelchdecke, können aber auch bei manchen Formen (†Nucleocrinus) weit auf die Kelchseiten hinuntergreifen und diese selbst zum größeren Teile zusammensetzen. Bei †Nymphaeoblastus gibt v. Peetz



Fig. 21.

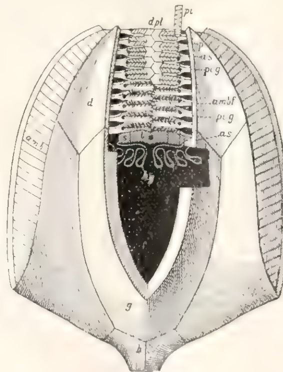


Fig. 22.

Fig. 21, 22. Rekonstruktionen von †Blastoideen.

Fig. 21. †Orophocrinus fusiformis W. u. Sp. Unterkarbon; Jowa, N. A. Ungefähr natürliche Größe W verzweigte Wurzel; St schlanker, drehrunder Stiel; B Basalia; G radiale Gabelstücke mit interradialen Deltoiden; Pi Pinnuletten auf den durch sie verdeckten Ambulakren. Aus Bather.

Fig. 22. †Pentremites Godoni Defr. Kelch; das zugekehrte Ambulakralfeld unten weggeschnitten, nach oben mehr und mehr mit zugehörigen Skelettelementen bedeckt. amb Ambulakralfeld; ambf Ambulakralfurche; as äußere Seitenplättchen; b Basalia; d interradiale Deltoidea; dpl Deckplättchen; g radiale Gabelstücke; hy Hydrospiren; l Lanzettstück mit Achsenkanal; p Poren zwischen den äußeren Seitenplättchen; pi zweizeilige Pinnula; pig Gelenkgrube für eine Pinnula. Nach Oehlert. Aus v. Stromer.

an, daß die anale Deltoidplatte durch eine quere Naht zweigeteilt ist; und die großen interradialen Platten zwischen den schmalen Ambulakralfeldern von †Nucleocrinus zeigen durch verschiedene Skulpturierung die ± deutliche Teilung in drei längsgerichtete Felder und damit (vielleicht) die Zusammensetzung aus drei ursprünglich getrennten Plättchen.

Inmitten der fünf Deltoidea liegt im Scheitel die kleine, ± fünfseitige Mundöffnung. Gewöhnlich wird sie offen gefunden; sie war aber wohl bei Lebzeiten der Tiere (immer?) von einem Mosaik kleiner Täfelchen bedeckt. Von ihr ziehen in den Einschnitten der „Gabelstücke" die fünf Ambulakra hin, welche hier einen ganz eigenartigen Bau zeigen. Zwischen den Deltoiden greift vom Scheitel her in den mit abgeschrägten Rändern versehenen Einschnitt eines jeden „Gabelstückes" je eine längliche Platte, das Lanzettstück, ein. Dieses ist der Länge nach von einem medianen Achsenkanal (Nervenkanal) durchbohrt, der oral zwischen je zwei Deltoiden nach innen in einen Ringkanal mündet. Bei einzelnen, †Pentremites, †Orophocrinus, wurde unter dem Lanzettstück ein zartes, dünnes, schlankes Kalkplättchen beobachtet, welches als zusammengedrückter Radialkanal, Wassergefäßkanal, gedeutet wird [Hambach]). Auf der Oberseite des Lanzettstückes verläuft median, radial eine ± feine Rinne, die Ambulakralfurche. Von ihr ziehen nach beiden Seiten sehr zahlreiche Querrinnchen, welche mit feinen Deckplättchen belegt sind. Neben dem Lanzettstück und dieses öfters ± weit bedeckend, liegt rechts und links je eine Reihe querer Seiten- oder Porenplättchen, neben die nach außen noch eine zweite Reihe meist kleinerer, äußerer Seitenplättchen treten kann. An den Enden der ambulakralen Seitenrinnen bilden Grübchen, auch kleine Höckerchen die Ansatzstellen zarter, aus zwei- oder wechselzeilig angeordneten Skelettelementen aufgebauter Pinnulae, in welche sich die seitlichen Ambulakralrinnen des Lanzettstückes fortsetzen und hier auch von feinen Deckplättchen überdeckt sind.

Der Mundöffnung meist dicht genähert liegt in einer (hinteren) Deltoidplatte der After, welcher wie der Mund von feinen Täfelchen bedeckt sein kann oder wohl auch in einer kurzen Afterröhre, Proboszis (†Pentremites conoideus) liegen kann.

Auf der oberen Kelchwand können in verschiedener Form und Lage besondere Oeffnungen, Spirakula, auftreten. Häufigst sind es rundliche Oeffnungen nahe dem Munde. Bei den †Pentremitidae, †Troostoblastidae und †Granatoblastidae scheinen sie gewöhnlich in der Zahl von fünf vorhanden zu sein und ihrer Lage nach mit den interradialen Deltoidplatten zu korrespondieren. Vier dieser Oeffnungen sind jedoch durch eine Leiste oder einen Vorsprung in der Fortsetzung des Deltoids in der Tiefe zweigeteilt und zwar so, daß jede Hälfte am Vorderende eines Halbambulakrum liegt. Die fünfte, größere (hintere) Oeffnung, welche hierzugleich den After enthält, ist durch zwei radiale Leistchen dreigeteilt — in der Mitte liegt die interradiale Afteröffnung. Bei anderen, den †Nucleocriniden, bleibt jedes der 10 Spirakula an der Kelchoberfläche getrennt und läßt dann deutlich seine radiale, ambulakrale Lage erkennen. Wieder bei anderen (†Orophocrinus) können die Spirakula als radiale Schlitze neben den Ambulakren ausgebildet sein, oder sie können auch ganz fehlen (†Codasteridae e. p.).

Jedes Spirakulum bildet die obere Endöffnung eines eigenartigen Hydrospirensystems, d. h. radial, in Bündeln (zu 1 bis 8) angeordneter, nach unten etwas erweiterter Falten oder nach der Außenseite zu offener Schläuche mit kalkigen Wänden. Diese Rinnen liegen meist subtegminal unter die Ambulakra geschoben und kommunizieren unter der Kelchwand in einem Längsspalt, welcher zwischen dem Ambulakrum und den Rändern von Deltoid- und Gabelstücken ausläuft, dabei — von den Seitenplättchen



Fig. 23, A—E. Querschnitte durch die Hydrospirensysteme und Ambulakra von: A †Codaster trilobatus, B †Orophocrinus verus, C †Mesoblastus lineatus, D †Orbitremites Norwoodi; E †Orbitremites derbyensis. amb Ambulakralrinne mit Decktafelchen; hy Hydrospirenrinnen resp. Schläuche; l Lanzettstück mit Achsenkanal; pi Pinnula; r(g) Rand der Gabelstücke resp. Deltoide; s Seitenplattchen. Nach Etheridge und Carpenter. Aus v. Stromer (A) und v. Zittel (B bis E).

des Ambulacrums bedeckt — nach außen in feinen Poren ausmündet. Seltener liegen die Hydrospiren als offene, schmale, den Ambulakra ± parallele Rinnen auf der Außenseite der Deltoide — also interradial und auf dem analen Interradius fehlend —, greifen auch auf die Gabelstücke über, also dann fehlen die Spirakula (†Codaster). Der letztere Fall stellt wohl das primitivste Hydrospirensystem dar. Die demnach primär interambulakrale Lage der Hydrospiren rechtfertigt Ludwigs Auffassung, daß sie mit den Bursen der Ophiuren zu vergleichen seien und Geschlechts- wie Atmungsorganen entsprächen. Sehr wahrscheinlich entsprechen die Hydrospiren der †Blastoideen ferner den Porenrauten mancher †Cystoidea (†Rhombifera).

Bei manchen †Blastoideen wird die regelmäßige Pentamerie des Kelches durch besonders kurze (†Pentephyllum) oder kurze und breite Form (Eleutherocrinus, †Zygocrinus) eines Ambulakrum, des hinteren linken, eingeschränkt. Diese Formen werden „irregulär", resp. erscheinen sie ± bilateral symmetrisch.

Die systematische Einteilung der †Blastoidea (F. A. Bather) läßt sich am besten nach dem Bau des Hydrospirenapparates und nach den Spirakula vornehmen; sie führt zur Unterscheidung dreier „Reihen" von Familien.

Die erste Reihe, die †Codonoblastida (Fam. †Codasteridae, †Pentremitidae; Obersilur-Perm) beginnt mit dem Typus †Codaster M'Coy (Obersilur-Karbon), wo auf der flachen Oberseite des nußförmigen Kelches mit großem Anus die Hydrospiren neben kurzen Ambulakren als offene Rinnen daliegen, und wo Spirakula fehlen.

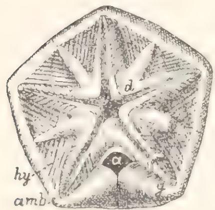


Fig. 24. †Codaster trilobatus M'Coy. Unterkarbon; Lankashire, England. Flache Oralseite. a Afterlücke; amb Ambulakrum; d Deltoid; g adoraler Teil des Gabelstücks; hy Hydrospirenschlitze. Nach Etheridge und Carpenter. Aus v. Stromer.

Bei †Phaenoschisma Eth. und Carp. (Devon, Unterkarbon) sind die Hydrospirenfalten, welche noch nicht in einem gemeinsamen Spalt kommunizieren, so von den Ambulakren und Seitenplatten bedeckt, daß nur noch ihre oberen Enden sichtbar sein können. †Cryptoschisma Eth. und Carp. (Devon) hat breite Ambulakra, welche die Hydrospirenschlitze meist vollkommen bedecken, längliche Spirakula können hier am oberen Ende der Ambulakra sichtbar sein, und †Orophocrinus v. Seeb. (Karbon) mit kleinem, knospen- bis dick quirlförmigem Kelch, mit langen, aber schmalen Ambulakren, und ebenfalls nahezu vollständig verdeckten Hydrospiren hat 10 lange, schlitzförmige Spirakula, welche neben den Ambulakren in die Deltoide und Radialia eingesenkt sind. Bei den †Pentremitidae (†Pentremitidea d'Orb.: Devon; †Pentremites Say, Karbon) mit schön regelmäßigen, keulen- bis birn- und melonenförmigen Kelchen sind die Hydrospiren bereits so weit unter die Ambulakra geschoben, daß sie unter der Außenwand des medialst gelegenen Schlauches, welche ± breit, eine „Hydrospirenplatte" bildet, liegen.

Die zweite Reihe, die †Troostoblastida, umfaßt die regulären †Troostocrinidae (Obersilur — Karbon) und die irregulären †Eleutherocrinidae. Bei den ersteren

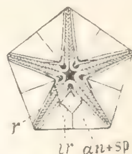


Fig. 25. †Troostocrinus Reinwardti Troost sp. Obersilur; Tennessee. Oralseite; an + sp gemeinsame Oeffnung des Afters und der beiden hinteren Spirakula; ir interradiale Deltoide; r radiale Gabelstücke. Nach Bather. Aus v. Zittel.

greift die Außenwand des medialen Hydrospirenschlauches nicht über die (3) anderen Schläuche hinüber; die fünf Spiracula sind durch die mit Ausnahme des analen sehr kleinen Deltoidea von unter her eingeschnürt (†Troostocrinus Schum., †Metablastus Eth. u. Carp., Obersilur, †Tricoelocrinus M. a. W., Karbon). Die ungestielten †Eleutherocrinidae (†Eleutherocrinus Schum. u. Yand., Devon) weichen durch Verkürzung und Verbreiterung des linken hinteren Ambulakrums und Gabelstückes, wie durch Vergrößerung der entsprechenden Basalia weit von der regulär pentameren Symmetrie ab; ihre übrige Organisation, die unter die 4 schmäleren Ambulakra geschobenen Hydrospiren zeigen große Aehnlichkeit mit den †Troostocriniden.

Der dritten Reihe endlich, den †Granatoblastida (Fam. †Nucleocrinidae, †Orbitremitidae, †Pentephyllidae, †Zygocrinidae) gehören ± melonenförmige bis unregelmäßige Typen an, deren Ambulakra, meist sehr lang und besonders schmal, bis in die Nähe der Basis reichen, und deren Hydrospirenfalten nur in geringer Zahl

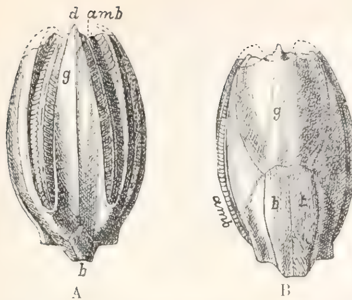


Fig. 26. †Eleutherocrinus Cassedeyi Schum. u. Yand. Mitteldevon: Hamilton, Ontario. N. A. A von vorn rechts, B von hinten links. amb Ambulakrum; b Basalia; g radiale Gabelstücke; d interradiales Deltoid. Nach Whiteaves. Aus v. Stromer.

(2, sogar nur 1) vorhanden sind. Der ± reguläre Typus †Nucleocrinus Conr. (Devon) ist ganz besonders dadurch auffallend, daß seine sehr großen Deltoide (das anale ist breiter als die übrigen) drei verschieden verzierte, meridional gerichtete Zonen auf der Außenseite erkennen lassen, welche vermutlich das Werden dieser Deltoide aus ursprüng-

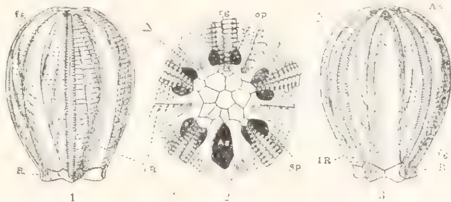


Fig. 27. †Nucleocrinus verneuili Troost sp. Unterdevon; Columbus, Ohio. 1 von vorn, 2 Ovalseite, 3 von hinten (Analinterradius). As After; cp Deckplättchen; gf Ambulakralfurche; iR und ⊿ oberflächlich dreiteilige Deltoide; R niedrige Radialia; sp Spirakula. Aus Bather.

lich getrennten Platten andeuten. †Nymphaeoblastus v. Peetz (Karbon) hat ein deutlich quergeteiltes anales Deltoid. Die sonst ähnlichen †Schizoblastus Eth. u. Carp. (Karbon) haben einfache Deltoide. Die karbonischen †Orbitremitidae (†Orbitremites Aust. = †Granatocrinus Hall, †Cryptoblastus Eth. u. Carp., †Acentrotremites Eth. u. Carp., †Mesoblastus Eth. u. Carp., †Heteroblastus Eth. u. Carp.) mit ± kugligen Kelchen, zum Teil mit konkaver Basis sind durch die Ausbildung einer „Hydrospirenplatte" ausgezeichnet. †Pentephyllum Haught. (Karbon) wird durch die Verkürzung des einen Ambulacrum und durch die Krümmung der 2 benachbarten leicht „irregulär", und bei †Zygocrinus Bronn (Karbon) ist die ungestielte Theka ganz eigenartig vierlappig, mit 3 auffallend großen Deltoiden, 4 langen linearen und einem kurzen breiten, von 2 sehr kleinen Deltoiden flankierten Ambulakrum.

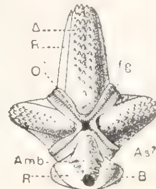


Fig. 28. †Zygocrinus Benniei Eth u. Carp. Unterkarbon; England. Oralseite. 4 Ambulakra normal, das 5. verkürzt und verbreitert. B Basale; ⊿ Deltoide; R Gabelstücke; O Mund; fg Ambulakralfurche; As? Oeffnung unbekannter Bedeutung. Nach Etheridge und Carpenter. Aus Bather. 10mal vergrößert.

Diesen seit dem Obersilur nachgewiesenen und dann besonders im Karbon (Nordamerikas auch Europas) häufigen „**Eublastoidea**" kann eine Gruppe untersilurischer Typen nahegestellt werden, die als „**Parablastoidea**" (Hudson) oder „Protoblastoidea" (Bather) sich um †Blastoidocrinus Bill. (Untersilur; Ostseeprovinzen Nordamerika) gruppieren lassen. Sie sind durch zahlreiche, zwischen die ungegabelten Radialia, die Deltoidea und Ambulakra eingeschobene Plättchen ausgezeichnet; über den unteren Teil der Deltoide verlaufen sehr zahlreiche, feine Hydrospirenrinnen. Die untersilurische Gattung †Asteroblastus Eichw. (gestielter, dicker, knopfförmiger, oben scharf pentamerer Kelch, mit sehr zahlreichen Kelchplatten mit Doppelporen; um den zentralen Mund ein fünfstrahliger Stern von Deltoidplatten und interradialen „Porenplatten" mit Doppelporen; die rhomboidischen Ambulakralfelder sind von queren alternierenden Plättchen bedeckt, auf deren Außenende schlanke gegliederte Pinnueletten oder Brachiolen stehen) wird von Bather den †Blastoideen, von Jaekel zusammen mit †Mesocystis den †Cystoideen zugezählt. Der ganze Habitus ist durchaus blastoid, der Kelchbau vielmehr cystoid

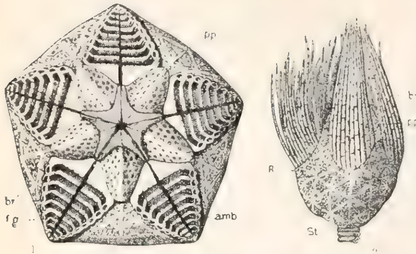


Fig. 29, 1. 2. †Asteroblastus Eichw. Untersilur; Pulkowa, Rußland. 1 †Ast. foveolatus Eichw. Oralseite. 2 †Ast. Volborthi Fr. Schm. Lateralansicht. amb Ambulakrum; br Pinnuletten, br' deren Facetten am Rande der Ambulakra; fg Ambulakralrinne; pp interradiale „Porenplatten", welche an die die Mundöffnung umgebenden Deltoide stoßen; R Radiale am distalen Ende eines Ambulakrums; St Stiel. Nach Fr. Schmidt. Aus Bather (2mal vergrößert).

5. Klasse Crinoidea Seelilien ?Kambrium; Untersilur bis jetzt. Fig. 30—52.

Die Organisation der Crinoidea ist im zoologischen Teil (s. S. 396 bis 404) unter vollständiger Verwertung des fossilen Materials so eingehend behandelt worden, daß unter Verweisung auf die dortigen Ausführungen hier nur eine Skizze des systematischen und stammesgeschichtlichen Verhaltens der Crinoideen erübrigt.

Von strittigen kambrischen Formen abgesehen — †Eocystidae, †Lichenoides, †Macrocystella (Cystoidea) — und von †Dendrocrinus cambrensis Hecks sind echte Crinoideen seit untersilurischer Zeit bekannt. Sie liefern im Paläozoikum das weitaus meiste, was von Echinodermen überhaupt und von Pelmatozoen im besonderen erhalten ist.

Zahlreich sind die Versuche, in den Crinoideen größere und kleinere systematische Einheiten auszusondern. Keiner der Versuche kann sich bislang allgemeinerer Anerkennung erfreuen; denn des öfteren gelingt es nicht, die Angehörigen solcher systematischen Einheiten, Ordnungen, welche wohl viel morphologisch Uebereinstimmendes zeigen, in genügend sichergestellten zeitlichen Zusammenhang zu bringen. Es sei z. B. auf das von v. Zittel benutzte System hingewiesen, welches das alte Joh. Müllersche System der Crinoideen mit den Ordnungen von Wachsmuth und Springer kombiniert. Die Ordnung der Costata z. B. umfaßt die Gattungen aus dem Silur-Devon, aus dem Jura, und heute lebende. Bei den Fistulata trennt eine große Lücke (Trias, Jura, Unterkreide) die paläozoischen Formen von den wenigen der oberen Kreide, und ein noch größeres Intervall schiebt sich zwischen die Flexibilia des Silur-Karbon und die der jüngsten Kreide ein. Wenn man nicht seine Zuflucht zu der Hoffnung auf Funde aus den Zwischenzeiten setzen will, so sagen solche Lücken recht eindringlich, daß die genannten systematischen Einheiten wohl kaum phyletische sind.

Ob die beiden moderneren Systeme von Bather und Jaekel den natürlichen Verwandtschaftsverhältnissen gerecht werden, läßt sich heute noch nicht entscheiden. Beide drücken die Trennung der Crinoideen in 2 von Anfang an scharf geschiedene Hauptgruppen aus. Bather nimmt dabei die Ausbildung der Basis — ob mono- oder dizyklisch resp. kryptodizyklisch — als beherrschendes Moment an und sieht in der Entfaltung seiner beiden Hauptstämme mehrfach parallele Wege eingeschlagen. Jaekel sieht strenge Zweistämmigkeit der Crinoidea in den Cladocrinoidea — mit mehr als 5 von der Grenze von Kelchwand und -decke sich abhebenden, „Pinnulae" tragenden Armen und meist vieltäfeligen Kelchen — und in den Pentacrinoidea — mit 5 ungeteilten oder geteilten Armen, die auf den Tafeln nur des untersten Radialkranzes aufsitzen und „Ramuli" statt „Pinnulis" tragen (vgl. Zoologischer Teil, S. 400); die ersteren mögen mit †Cystoideen verwandt sein, die letzteren sollen isoliert dastehen.

Wenn hier im Einklang mit dem zoologischen Teil dieses Artikels dem System Bathers gefolgt wird, so soll damit nicht ausgedrückt sein, daß hierin ein wirklich natürliches System vorläge, fehlt es doch noch an zahlreichen Stellen auch dieses Systems daran, die Verbindung zwischen den einzelnen Familien einer Ordnung und die Zusammenhänge der Ordnungen sicher zu beweisen. Die Bezeichnung der Kelch- und Armtafeln ist hier nach Bather, resp. Wachsmuth und Springer vorgenommen; d. h. alle über dem ersten Radialkranz folgenden Tafeln werden als Brachialia gezählt.

1. Unterklasse Monocyclica Bather (vgl. Zoologischer Teil S. 405). Ordnungen: Inadunata, †Adunata, †Camerata.

1. Ordnung Monocyclica Inadunata (= Monozyklische Larviformia Zittel = Inadunata larviformia Wachsm., †monozyklische Fistulata Zittel; †Costata Inadunata Müller). ?Kambrium, Untersilur-Karbon, Oberjura, Jetzt.

Familien †Hybocrinidae, Silur, †Stephanocrinidae, Obersilur; †Heterocrinidae, Kambrium, Silur; †Calceocrinidae, Untersilur bis Karbon; †Risocrinidae, Obersilur, Devon; †Catillocrinidae, Mitteldevon—Unterkarbon; †Zophocrinidae, Obersilur; †Haplocrinidae, Devon; †Allagecrinidae, Unterkarbon; †Belemnocrinidae, Unterkarbon; †Plicatocrinidae, Oberjura; Hyocrinidae, rezent.

Die überwiegendst paläozoischen monozyklischen Inadunata beginnen möglicherweise schon im Kambrium mit dem unsicheren †Dendrocrinus cambrensis Hicks (? †Heterocrinidae). Vom Untersilur ab bis ins Karbon sind sie in etwa 70 Gattungen nachgewiesen; nur 4 Gattungen: †Plicatocrinus, †Tetracrinus, Psalidocrinus und †Saccocoma sind aus dem oberen Jura bekannt; zwei, Hyocrinus W. Thoms und Gephyrocrinus Köhl. und Bath., leben heute. In dem nur

als „Patina" entwickelten Kelch der meist sehr kleinwüchsigen Formen können über einer 3- bis 5teiligen kleinen Basis die RR (mit eingeschaltetem RA) unsymmetrisch werden durch Querteilung in Infra- und Supraradiale (z. B. †Hyleocrinidae, †Heterocrinidae, †Haplocrinidae u. a.) und — oder auch — dadurch, daß einzelne RR, gewöhnlich das linke hintere und das vordere größer und unregelmäßig geformt werden (z. B. †Pisocrinidae, †Catillocrinidae, †Allagecrinidae, †Haplocrinidae); nur 4 RR sind bei den †Zophocrinidae vorhanden. Bei den (larviformen) †Pisocriniden, †Haplo-, †Allage-, †Symbathocrinidae ist die Kelchdecke von 5 großen O und von kleinen ambulakralen und interambulakralen Täfelchen gebildet; welche aber nicht fest verwachsen sind. Die Arme sind einzeilig, unverzweigt und meist ohne Pinnulae (†Hybo-, †Piso-, †Catillocrinidae), oder verzweigt mit Pinnulis (†Hetero-, †Plicatocrinidae) oder auch ohne solche (Hyocrinus). Die Arme von †Calycanthocrinus Follm. sitzen auf besonderen „Pararadialien", meist interradial liegenden Täfelchen, die aus ± schiefer Spaltung der RR hervorgegangen sein mögen. In †Stephanocrinus liegt ein durch die Einsenkung der Arme in tiefe Ausschnitte der RR besonders eigentümlicher Typus vor, bei dem in den Nähten zwischen den RR Poren (atrophierte Hydrospiren?) vorkommen, welche Aehnlichkeit mit den †Blastoideen ergeben.

Bei den zeitlich ganz isoliert stehenden †Plicatocrinus, †Tetracrinus (und †Psalidocrinus) des Oberjura, die Jaekel mit den paläozoischen †Hybocrinen, den adunaten †Hapalocrinen, den dizyklischen, flexibilen Rhizocrinen und mit †Saccocoma als „Costata" auffaßte, ist der ± trichterförmige Kelch von 4 bis 8 (seltener 5) dünnen RR auf kleiner ungeteilter Basis aufgebaut; die schlanken, über nur einem axillären Br geteilten, wechselzeiligen Arme tragen alternierende Pinnulae.

Besonders eigenartig ist †Saccocoma Ag. aus dem Oberjura. Der kleine ungestielte, ± kuglige Kelch besteht über winziger, ungeteilter Basis aus 5 großen RR mit dorsaler Mediankante. Die zarten, einrollbaren Arme sind über dem axillären Br2 in 2 Aeste geteilt, welche weiter distal alternierende Zweige abgeben; flügelartige Anhänge der Armglieder sind an den proximalen Gliedern breit lappig, an den distalen schmal. Das äußerst dünne Skelett ist mit einem Netzwerk feiner Leisten überzogen. †Saccocoma, das gewöhnlichste Fossil der lithographischen Schiefer Frankens, muß als (?planktonische) Schwimmform aufgefaßt werden.



Fig. 30.

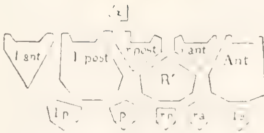


Fig. 32.

r
b
Fig. 31.

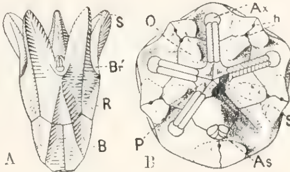


Fig. 33.

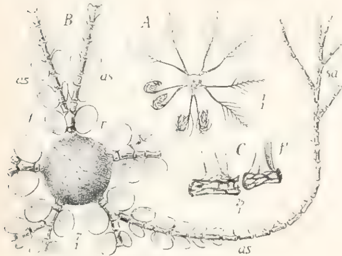


Fig. 34.

Fig. 30 bis 34. Monocyclica Inadunata.

Fig. 30. †Haplocrinus mespiliformis Gf. Mitteldevon; Gerolstein, Eifel. — Kelch von oben; o Orale, r Radiale mit Gelenk für die Brachiale. Aus v. Stromer.

Fig. 31. †Pisocrinus pilula de Kon. Obersilur, Gotland. b Basale, r Radialia. Aus v. Stromer.

Fig. 32. †Pisocrinus. Kelchanalyse. Untere Reihe: Basalia la, ra linkes und rechtes vorderes B; p hinteres, lp, rp linkes und rechtes hinteres B. Obere Reihe: Ungleiche Radialia: Ant vorderes, l.ant, r.ant linkes und rechtes vorderes R. R¹ r.post. rechtes hinteres, l.post. linkes hinteres R; x Analtafel. Aus Bather.

Fig. 33, a, b. †Stephanocrinus angulatus Conr. Obersilur; Lockport N. Y. a Lateral-, b Oralansicht. As After, mit Täfelchen bedeckt; Ax axilläres Br.; Br¹ Abzweigungsstelle der Arme; h Poren, ? atrophierte Hydrospiren; O Oralia; P Decktafeln über dem Munde; R Radialia; S Fortsätze der R, in b abgebrochen). Aus Bather.

Fig. 34, A bis C. †Saccocoma tenella Gf. Oberjura, lithogr. Schiefer; Eichstädt, Bayern. A von unten in natürlicher Größe, 2 Arme eingerollt; B von unten vergrößert; C 2 distale Armglieder vergrößert, die Netzleisten des Skeletts zeigend. as Hauptäste der Arme über axillärem Br 2; f, f¹ flügelartige Anhänge der BrBr; r Radialia; sa distale Verzweigungen der Arme. Nach Jaekel. Aus Steinmann.

Ueber den rezenten Typus Hyocrinus, dem Gephyrocrinus nahe steht (vgl. S. 405).

2. Ordnung †Monocyclica Adunata, Bather (Camerata Wachsmuth e. p., Costata Jaekel e. p.). Obersilur bis Karbon. Familien: †Platycrinidae, Obersilur-Karbon; †Hexacrinidae, Devon-Karbon; †Acrocrinidae, Oberkarbon.

Am Bau der Kelche dieser Monocyclica sind ursprünglich nur BB (meist 3) und 5 RR beteiligt, zu denen eine große interradiale Tafel treten kann (z. B. †Hexacrinidae). Weiter werden dann auch proximale BrBr und interradiale Täfelchen — fest aneinandergefügt — in die Kelchwand aufgenommen (vgl. †Marsipocrinus). Interbrachiale ambulakrale und interambulakrale Täfelchen bilden eine solid getäfelte Kelchdecke, in der bei †Coccocrinus 5 große Oralia liegen, und über die eine kurze Analröhre emporragen kann (†Platycrinus). Die Arme spalten sich manchmal bereits über dem 1. (axillären) Br in 2, kurz darauf nochmals in 2 oder mehr Aeste; sie sind wechselzeilig (†Hapalocrinus) oder wechsel- bis zweizeilig (†Marsipocrinus, †Platycrinus) oder einzeilig (†Hexacrinus) gebaut und beiderseits mit Pinnulis oder auch mit Ramulis (†Hexacrinus) besetzt.

Zu den häufigsten Formen gehört besonders im Unterkarbon †Platycrinus Mill. (Devon, Karbon) und im Mitteldevon Europas †Hexacrinus Aust. Ein besonders eigenartiger Typus ist †Acrocrinus Yand. (Karbon, Nordamerika),

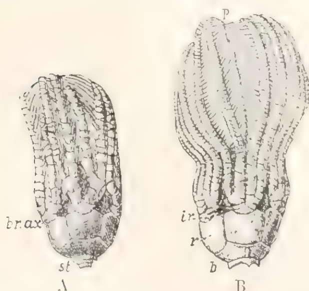


Fig. 35. †Monocyclica Adunata. †Platycrinus Huntsvillae Troost. Unterkarbon; Huntsville, Alabama. A Krone eines jungen Tieres mit glatten, B eines erwachsenen Tieres mit verzierten Kelchtafeln. b Basis; br.ax erstes, axilläres Primibrachiale; p Pinnulae; r Radiale; st proximale Stielglieder. Nach Wachsmuth und Springer. Aus v. Stromer.

bei dem sich zwischen die BB und RR 10 bis 20 Kreise von Schalttäfelchen („Suprabasalia" einschieben, und wo die Arme (unbeweglich?) nach unten über den Kelch zurückgeschlagen sind.

3. Ordnung †Monocyclia Camerata, Bather (Camerata W. und Sp., Cladocrinoidea Jaekel). Untersilur bis Karbon. Die überwiegende Mehrzahl der Camerata Wachsmuth und Springers sowie Zittels ist durch monozyklische, meist dreiteilige, Basis ausgezeichnet. An dem Bau der vieltäfeligen Kelche nehmen BrBr und iBr meist in mehreren Kreisen teil. Stets ist ein ± mehrtäfeliger analer Interradius vorhanden. Die Kelchdecke ist ein festgefügtes Gewölbe aus ambulakralen Decktäfelchen und ± zahlreichen interambulakralen Platten, unter welchen Mund und Ambulakra „subtegminal" liegen. Die exzentrisch oder subzentral bis zentral liegende Afteröffnung befindet sich häufig am oberen Ende einer Afterröhre („Proboscis"), welche hin und wieder über die mehrfach geteilten, zwei-, wechsel- oder einzeiligen, Pinnulae tragenden Arme hinausragen kann (†Batocrinus, †Callicrinus).

Bather unterscheidet hier 3 Unterordnungen: 1. †Melocrinoidea, 2. †Batocrinoidea, 3. †Actinocrinoidea (Fig. 36 bis 41 S. 476).

1. Bei den †Melocrinoidea, Untersilur-Devon (mit den Familien: †Glyptocrinidae, Untersilur, †Melocrinidae, Obersilur bis Devon, †Patellocrinidae, Silur, †Clonocrinidae, Obersilur-Devon, †Eucalyptocrinidae, Obersilur-Devon, †Dolatocrinidae, Devon) sind über drei- bis fünfteiliger, fünfseitiger Basis zwischen die RR keine interradialen Tafeln geschaltet. Bis 8 Kränze von BrBr sind in die Kelchwand eingeschlossen, zu denen vom Br_1 aufwärts interbrachiale Tafeln in größerer Zahl treten. Die Zahl der Arme ist 10 und mehr.

Unter den namentlich im Obersilur und Devon häufigen Formen ist †Glyptocrinus Hall (Untersilur, Nordamerika) durch radialstrahlige Verzierung der Kelchtäfelchen ausgezeichnet. Im Obersilur und Devon sind Arten von †Melocrinus Gf. (†Ctenocrinus, Bronn) recht häufig: mit vierteiliger Basis, vieltäfeligem, birnförmigem Kelch und 10 schlanken, einzeiligen Armen, die zu je 2 dicht aneinander gestellt sind; im unterdevonischen „Spiriferensandstein" des Rheinischen Schiefergebirges sind Hohldrucke der meist runden Stiele mit Ausfüllungen des Zentralkanals und der Zwischenräume zwischen den niedrigen Kolumnalien (mit radial gerieften Querflächen), die sogenannten „Schraubensteine" sehr häufige Erscheinungen. †Melocrinus nahegestellt wird die Gattung †Scyphocrinus Zenk., Obersilur von Böhmen und Nordamerika, zu der auch die von Barrande als Lobolithus, sonst als Camarocrinus, bezeichneten, bis faustgroßen, ± kugeligen Körper gerechnet werden, deren Innenraum durch Querwände in verschiedene Kammern geteilt wird; sie werden als Schwimmorgane am distalen Stielende eines Crinoideen (Schuchert) oder wohl auch als Ankerwurzeln (Jaekel) gedeutet.

Die niedrigen, schüsselförmigen Kelche von †Clonocrinus Qu. mit tief gehöhlter Basis (4 BB) tragen 20, noch mehrfach geteilte zweizeilige Aeste.

Auffallend sind die †Eucalyptocrinidae (Obersilur, Devon): Ueber dem niedrigen, massigen Kelch mit sehr tief gehöhlter Basis, dessen RR und erste iBr iBr bei †Callicrinus in dicke Sporne auslaufen, erhebt sich eine besonders massive, großtäfelige Decke von Flaschenform, an deren Oberende der zentrale After liegt, und deren distale wie die proximal interbrachial ge

legenen Tafeln sehr massige Fortsätze tragen können (besonders bei †Call. Murchisoni); bei †Eucalyptocrinus Gf. (Obersilur, Devon) werden diese zu großen, hohen, radial gestellten Platten. In den von ihnen gebildeten 10 „Nischen" liegen paarweise die 20 zweizeiligen Arme mit dichtstehenden Pinnulus. Bei den †Dolatocrinidae sind an der Grenze zwischen Kelch und Decke schlitzförmige, respiratorische (?) Poren zwischen den interbrachialen Täfelchen beobachtet; vgl. auch die Poren in der Decke von †Batocrinus u. a. (s. S. 400).

2. Batocrinoidea mit den Familien: †Tanaocrinidae, Untersilur; †Xenocrinidae, Silur, †Carpocrinidae Obersilur-Devon, †Barrandeocrinidae, Obersilur, †Coelocrinidae, Devon-Karbon, †Batocrinidae, Unterkarbon, †Periechinocrinidae, Obersilur-Karbon. Ueber meist dreiteiliger, sechsseitiger Basis wird in den Radialkranz eine Analplatte eingefügt, über der ± zahlreiche Täfelchen so im hinteren Interradius folgen können, daß über dem ersten Anale ein zweites oder auch mehrere eine mediane Reihe bilden können. Ueber dem verschieden geformten Kelch mit meist zahlreichen (bis mehr als 5) Kränzen von BrBr (und ebenfalls zahlreichen interbrachialen Tafeln) kann die vieltäflige, starre Decke in eine — bei †Batocrinus die Arme an Länge überragende — Analröhre ausgezogen sein. Die 10, 20 und mehr freien Arme sind meist zweizeilig, einfach, auch mehrfach verästelt und tragen Pinnulae. Die im Untersilur mit †Tanaocrinus und †Xenocrinus einsetzenden †Batocrinoidea sind besonders häufig im Devon (†Coelocrinidae, †Dorycrinus) und Unterkarbon, wo namentlich die †Batocrinidae mit zahlreichen Gattungen herrschen: †Batocrinus Cassed., †Eretmocrinus Lyon und Cassed., †Dizygocrinus W. und Sp., †Lobocrinus W. und Sp. florieren. Besondere Ausbildung der Arme zeigt †Barrandeocrinus Ang. (Obersilur): das obere Ende des dicken runden Stieles und der ziemlich kleine Kelch mit 3 Kreisen von BrBr und iBr iBr werden (ähnlich wie bei †Acrocrinus, Monoc. adunata) von den 10, nach unten umgeschlagenen, dicken, zweizeiligen Armen bedeckt, deren schlanke, lange und sehr zahlreichen Pinnulae — wenn geschlossen — über die Ambulakralrinne in 2 Rollen gelegt werden.

3. Die †Actinocrinoidea — mit den †Actinocrinidae und †Amphoracrinidae, Unterkarbon — haben über dreiteiliger, sechsseitiger Basis im Radialkranz eine hexagonale Analtafel, über der im analen Interradius zunächst 2 Tafeln (nicht eine wie bei den †Melocriniden) folgen. In die Kelchwand sind 3 Brachialkranze fest eingefügt (der 2. und 3. axillär) und ebenso ± zahlreiche iBr iBr, wie auch einzelne iBrII. Die Decke wird als festes Gewölbe von ambulakralen und interambulakralen Täfelchen gebildet, unter denen „subtegminal" die von feineren Täfelchen umgebenen Ambulakralröhren von den Armen zum Munde verlaufen (bei †Cactocrinus besonders gut nachgewiesen). Der Anus liegt auf manchmal länger ausgezogener Proboscis. Die 10 bis 30, zweizeiligen Arme mit dichtstehenden Pinnulis werden entweder von gleichliegenden Br Br abgegeben (†Cactocrinus), oder sie entspringen von alternierenden BrII und BrIII (†Actinocrinus Mill.). Die Gattungen der †Actinocrinidae (†Actinocrinus Mill., †Steganocrinus M. u. W., †Cactocrinus W. u. Sp., †Teleiocrinus W. u. Sp., †Physetocrinus Mill. und Gurl.) sind im Unterkarbon besonders Nordamerikas häufig. Die †Amphoracrinidae (†Amphoracrinus Aust.) mit abwärts gebogenen Fortsätzen an den proximalen Teilen der Arme sind aus dem Unterkarbon Europas wie Nordamerikas bekannt.

2. Unterklasse Dicyclica Bather. Die Basis wird von zwei alternierenden Tafelkränzen, JBJB und BB, gebildet; die JB können (sekundär?) fehlen: Cryptodicyclica Gurley (Pentacrinidae, Apiocrinidae, Holopidae, Antedonidae, Bourgeticrinidae); stets aber ist auch im letzteren Falle die aborale Fortsetzung des „gekammerten Organs" radial gelegen (vgl. S. 398). In der Entfaltung der Dicyclica sieht Bather ± parallele Vorgänge zu jener der Monocyclica in bezug auf die Bildung von Kelch und Decke (Uebergang von „inadunaten" Typen zu ± „adunaten" und „cameraten"). Er unterscheidet die drei Ordnungen der Inadunata, Flexibilia und Camerata.

1. Ordnung Dicyclica Inadunata (= Inadunata W. u. Sp. e. p., = Fistulata W. u. Sp. und Zittel e. p. †Articulata J. Müll. †Larviformia Wachsm., Zittel e. p.).

Wenn in den ursprünglich nur aus dizyklischer Basis und R R und hin und wieder eingeschaltetem Anale bestehenden Kelch (= Distincta Bath.) proximale BrBr resp. auch iBr einbezogen werden (= Articulata Bath.), so sind diese Tafeln doch nie starr in die Kelchwand gefügt. Daß neue Kolumnalia nur am oberen Ende des Stieles eingefügt würden (Bather vgl. S. 405), scheint sich nach fossilem Material von Pentacriniden nicht zu bestätigen.

Seit dem Untersilur sind inadunate Dicyclica bekannt; ihre Hauptentfaltung liegt im Paläozoikum; vereinzelt — Pentacrinidae und Bathycrinidae — sind sie auch noch heute lebend.

Nur fossil kennt man die Unterordnung †Cyathocrinoidea (Untersilur-Perm) mit den Familien: †Carabocrinidae Untersilur, †Palaeocrinidae Untersilur-Devon, †Euspirocrinidae Silur, †Sphaerocrinidae Devon-Karbon, †Cyathocrinidae Obersilur-Perm, †Petalocrinidae Obersilur, †Crotalocrinidae Devon-Oberkarbon, †Cupressocrinidae Mitteldevon, †Gasterocomidae Devon-Perm.

Die Kelchdecke zeigt öfters große dreiseitige Oralia, welche die Mundöffnung umgeben, aber nicht bedecken, und deren laterale Ränder die Ambulakralrinnen tragen, welche wie der Mund von öfters größeren Saumplättchen bedeckt werden. Eine manchmal recht lang ausgezogene Analröhre kann vorhanden sein (†Cyathocrinus, †Lecythocrinus, †Euspirocrinus und andere). Die ungeteilten oder verzweigten Arme haben keine Pinnulae.

Von den älteren silurischen Formen ist besonders der Palaeocrinide †Porocrinus Beyr.

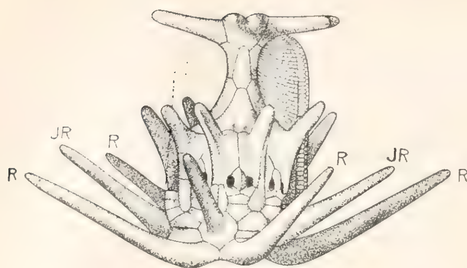


Fig. 36.



Fig. 37.

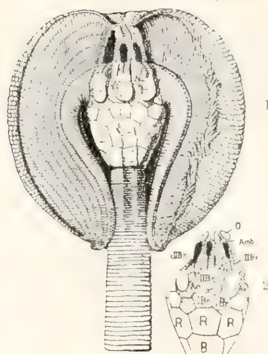


Fig. 38.

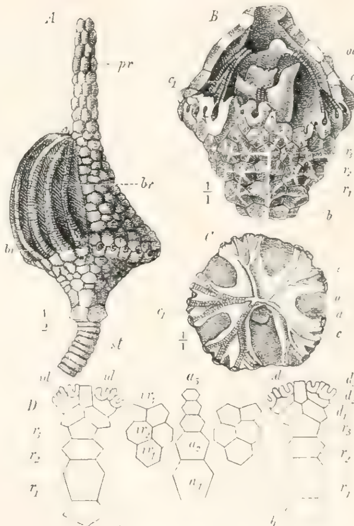


Fig. 40.

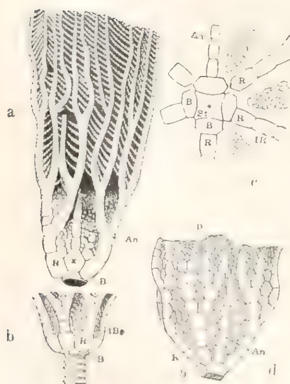


Fig. 39.

Fig. 41.

Fig. 36 bis 41. †Monocyclica Camerata.

Fig. 36. †Callicrinus Murchisoni Ang. (†Melocrinoidea). Obersilur; Gotland. Mit Ausnahme des einen rechten sind die Arme entfernt, um den Bau der Decke zu zeigen. R Radialia,

Untersilur) hervorzuheben, dessen Kelchtafeln Rautenfalten tragen, welche an die Porenrauten dichoporiter †Cystoideen erinnern, aber nicht wie diese senkrecht zu den Tafelnähten liegen. Nahezu weltweit verbreitet und langlebig ist der Typus †Cyathocrinus Mill. (Silur-Perm) mit einer Analplatte zwischen den RR; die mit fünf breiten proximalen BrBr beginnenden einzeiligen Arme sind mehrfach dichotom verzweigt. Verwandt sind die Gattungen †Arachnocrinus M. u. W., Obersilur-Devon; †Gissocrinus Ang., Obersilur, mit 3IB, mit sehr verzweigten Armen; †Lecythocrinus Mill. Devon mit winzigen IB mit sehr langer Proborgis, u. a. — In eigenartiger Weise sind bei †Petalocrinus Well. u. Dav. (Obersilur), vermutlich einem Abkömmling der †Cyathocrinidae aus † Arachnocrinus, die Arme umgebildet: auf fünf relativ großen RR gelenken mit einem niedrigen IBr breite, dreiseitige blattförmige Platten, zu denen die zahlreichen Verzweigungen der Arme seitlich verwachsen sind, wie aus dem Verlauf der Ambulakralrinnen mit ihren Deckplättchen auf der Ventralfläche dieser Arme zu erkennen ist. — ± weitgehende seitliche Verwachsung der Armteilungen findet auch bei den †Crotalocrinidae (Obersilur) statt, bei †Enallocrinus d'Orb. und †Crotalocrinus Aust.; bei letzterem namentlich sind über dem niedrigen Kelch mit besonders großen BB und niedrigen RR die Arme durch Verwachsung seitlicher Fortsätze der BrBr zu sehrbreiten, seitlich einrollbaren, siebartig perforierten Blättern oder Lappen geworden. — Die vielfach als „Larviformia" aufgefaßten †Cupressocrinidae (†Cupressocrinus Gf., Devon) mit vierseitigem Stiel und vier peripheren Kanälen in ihm, besitzen in dem niedrigen Kelch eine als „Konsolidationsapparat" bezeichnete, massive Decke aus fünf großen, blattförmigen Oralia um eine große zentrale Oeffnung mit fünf radialliegenden Durchtritten für die Ambulakralstämme und mit weitem Analdurchbruch der einen Platte. Die einzeiligen Arme sind besonders breit und dick, aus wenigen massiven BrBr bestehend, deren ventrale Seitenränder dünne, große, ambulakrale Täfelchen (Pinnulae, Zittel) tragen. — Bei den †Gasterocomidae (†Gasterocoma Gf., Devon, †Hypocrinus Beyr., Perm) ist der After auf die Kelchwand verlagert. — ? †Timorocrinus Wann., Perm, Timor.

Unterordnung Dendrocrinoidea (Charakteristik s. Seite 405). Vom Untersilur (†Dendrocrinidae) bis jetzt existieren dizyklische und kryptodizyklische (Pentacrinidae) Dendrocrinoideen, bei welchen vom Mesozoikum ab proximale BrBr und iBr in die Kelchwand einbezogen werden können.

Noch bis in die Trias sind dabei diejenigen Typen zu verfolgen, bei denen ein Inkorporieren der BrBr in die Kelchwand nicht statthat, Bathers †„Distincta" mit den Familien: †Dendrocrinidae Untersilur-Devon, †Botryocrinidae Obersilur-Karbon-†Lophocrinidae Oberkarbon, †Scaphiocrinidae Devon-Karbon, †Scytalocrinidae Karbon, †Graphiocrinidae Karbon-Perm, †Cromyocrinidae Karbon-Perm, †Encrinidae Karbon-Trias.

Die †Dendrocrinidae besitzen ein ± großes Radianale (untere Hälfte des rechten hinteren R) und eine Analplatte im hinteren Interradius, ihre Arme sind regelmäßig dichotom, ohne Pinnulae (†Dendrocrinus Hall, Silur, †Merocrinus Walc., Untersilur, †Homocrinus Hall, Obersilur und Devon). — Bei den †Botryocrinidae mit kleinem Radianale, mit in zwei

Fortsetzung der Figurenerklärung von S. 476.

IR erste Interbrachialia mit dornigen Fortsätzen; obere iBr und Intersekundibrachialia mit Nischenstücken. Nach Angelin. Aus Bather.

Fig. 37. †Callicrinus costatus Ang. Obersilur; Gotland. Kelch und Decke. R Radialia; IBr, IIBr, IIIBr Primi-Tertiibrachialia; iBr Interbrachialia; Br' Ansatzstellen der Arme; I bis III Stellen der Interbrachialen Nischenstücke; 1 bis 4 Zyklen der Proboszis.

Fig. 38, 1, 2. †Barrandeocrinus sceptrum Ang. (†Batocrinoidea). Obersilur; Gotland. 1 Rekonstruktion; 3 Arme sind weggebrochen; zwischen den zurückgeschlagenen Armen mit ungemein zahlreichen Pinnulis ein Teil der Decke sichtbar. 2 Analyse des Kelches; B Bas., R Rad.; IBr_1 und Ax Primibrach.; IIBr Sekundibrach.; Amb ambulakrale, O orale Tafeln der Decke. Nach Angelin. Aus Bather.

Fig. 39 a, b, c, d. †Batocrinoidea. a, b †Tanaocrinus typus W. u. Sp. Untersilur; Ohio. a Anal-, b Antanalseite. c †Xenocrinus S. A. Mill. Untersilur; Ohio. Kelchanalyse. d †Compsocrinus Harrisi W. u. Sp. Untersilur; Ohio. Kelch von der Analseite. An analer Interradius mit einzeiliger Mittelreihe; B Bas.; iBr IR interbrachiale, interradiale Kelchtafeln; P Pinnulae; R Radialia; St Stiel; x interradiale Analtafel. a—d nach Wachsmuth und Springer. Aus Bather.

Fig. 40 A bis D. †Batocrinoidea und †Actinocrinoidea. A †Batocrinus pyriformis Shum. Unterkarbon; Burlington, Jowa. Rechts sind die Arme br entfernt, um die Decke und die sehr hohe Analröhre pr zu zeigen. D Kelchanalyse eines †Batocriniden (b Bas.; r_1 Rad.; r_2 r_3 Primibrach.; d_1 d_2 Sekundibrach., d_3 Tertiibrach.; a_1 interrad. Analtafel; a_2—a_5 mittlere Analtafeln; ir_1—ir_3 Interbrachialia im Analinterradius; id Intersekundi- und -tertiibrach.). B, C †Cactocrinus proboscidalis Hall. Unterkarbon; Burlington, Jowa. B Kelch mit aufgebrochener Decke; Mund oo und mit feinen Täfelchen bedeckte Ambulakra c_1 subtegminal; in der Mitte Reste der Darmwand (?). C Kelchdecke, Steinkern der Innenseite. a After, c verzweigte Ambulakra, mit feinen Decktäfelchen c_1; o Mund. Zeichen sonst wie in Fig. 40 D. Nach Meek und Worthen. Aus Steinmann.

Fig. 41, a, b. Poren in den Kelchdecke von a †Dolatocrinus, b †Batocrinus. iamb Interamb.-Tafeln, p Poren Br' Ambulakralrinnen zu den Armen. Aus Bather.

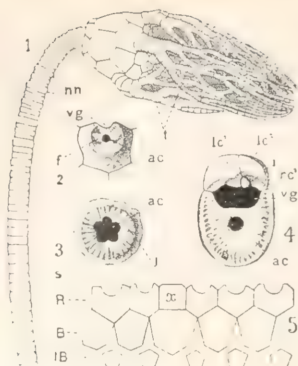


Fig. 42.

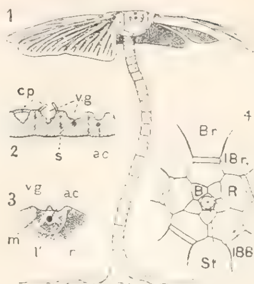


Fig. 44.

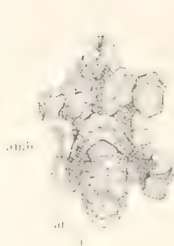


Fig. 43.

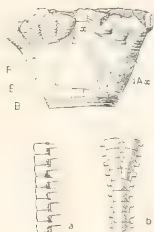


Fig. 45.

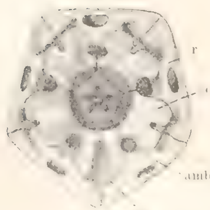


Fig. 46.

Fig. 42—46. Dicyclica Inadunata. †Cyathocrinoidea.

Fig. 42. †Cyathocrinus Mill. 1 †C. multibrachiatus Ang. Obersilur; Gotland. Stiel mit dickeren Nodalia nn; zwischen den Armen ist die Analröhre t sichtbar. 2 †C. visbycensis Bath. Obersilur; Gotland. Radiale mit der Gelenkfacette und dem Gelenkriff f für das Brachiale. ac Axialkanal, vg Ambulakralrinne. 3, 4 †C. acinotubus Bath. Obersilur; Gotland. 3 Stielglied mit oberer Gelenkfläche j. 4 Armglied mit Axialkanal ac, Ambulakralfurche vg, linken und rechten Deckplättchen lc^1, lc^2, rc^1 und überzähligen Deckplättchen i. — 5 Kelchanalyse (x interradiale Analtafel). Aus Bather.

Fig. 43. †Cyathocrinus brevicacculus W. u. Sp. Unterkarbon; Nordamerika. Kelchdecke; a durchschnittene Analröhre; amb Ambulakra mit Deckplättchen; m Madreporit. Nach Bather. Aus v. Stromer.

Fig. 44. †Petalocrinus Well. u. Davids. Obersilur; 1, 2, 4 P. mirabilis Well.; Jones Co., Jowa. 1 Rekonstruktion; ein Arm ist weggelassen, um die Gelenkfacette am Radiale zu zeigen (2mal vergrößert). — 2 Schnitt durch einen Teil eines Arm„fächers" (vg Ambulakralrinnen, ac Axialkanal, cp Deckplättchen, s Andeutung der Grenzen zwischen den ursprünglichen Armteilungen). — 4 Kelchanalyse, auffallend niedriges Primibrachiale 1, darüber verbreiterter Armfächer B. 3 †P. visbycensis Bath. Gotland. Gelenkfacette für den Armfächer. l dorsale Ligamentgrube; m Muskelgrube; r Gelenkriff. Aus Bather.
Fig. 45, 1—3. †Crotalocrinidae. 1, 2 †Enallocrinus scriptus W. u. Sp. Obersilur; Gotland. — 1 Kelch mit proximalen Armteilen (IAx axilläres Primibrachiale; x interradiale

Fortsetzung der Figurenerklärung auf der folgenden Seite.

Hauptäste gespaltenen, Pinnulae tragenden Armen ist unter den zahlreichen Gattungen †Botryocrinus Ang. (Obersilur und Devon) besonders dadurch wichtig, daß hier die Entstehung des Stieles aus sechs alternierenden Reihen von hexagonalen Plättchen deutlich erkennbar ist. — †Lophocrinidae, Arme ungeteilt mit alternierenden „Ramulis", die von jedem zweiten Br ausgehen, †Lophocrinus H. v. Mey., Oberkarbon. — †Scaphiocrinidae (†Poteriocrinidae auct. e. p.) mit dichotom mehrfach geteilten Armen mit Pinnulis, mit meist hoher, gefältelter Analröhre, Devon und besonders häufig im Karbon, †Poteriocrinus Mill., †Scaphiocrinus Hall, Woodocrinus de Kon. — Diesen nahe stehen die karbonischen †Scytalocrinidae mit schlanken, gegabelten Armen (†Decadocrinus W. u. Sp., †Scytalocrinus W. u. Sp.). — Den †Graphiocrinidae mit niederem Kelch, mit konkaver Basis, mit gegabelten Armen ohne Pinnulae fehlt ein echtes Radianale. Neben karbonischen Gattungen (†Graphiocrinus de Kon.) enthalten sie eine der wenigen permischen: †Delocrinus Mill. und Gurl. mit zweizeilig werdenden Armen. — Unter den karbon-permischen †Cromyocrinidae mit massigem Kelch und einfachen oder zweispaltigen, gewöhnlich zweizeiligen, kräftigen Armen (†Cromyocrinus, †Phialocrinus Trautsch, †Tribrachiocrinus M'Coy, Perm) ist †Agassizocrinus Troost (Karbon) stiellos; die sehr großen BB sind zu einem dicken Knopf verwachsen. — Im Karbon beginnen auch die bis in die Trias gehenden †Encrinidae. Bei den älteren Formen (†Stemmatocrinus Trautsch. Oberkarbon und †Erisocrinus M. und W., Unterkarbon-Perm) ist noch eine anale Platte auf dem rechten und linken hinteren R vorhanden; sie fehlt bei dem in der Trias weit verbreiteten †Encrinus C. F. Schulze mit niedrigem, massivem Kelch, recht kleinen JBJB, mit zehn zweigeteilten dicken Armen über axillärem IBr2; seine Stiel-, Kelch- und Armglieder bauen häufig — in riesigen Mengen vorkommend — die „Trochitenkalke" des oberen Muschelkalkes in der germanischen Trias auf.

Bathers articulate Dendrocrinoidea beginnen in der Trias mit den Pentacrinidae. In †Dadocrinus H. v. Mey. (Trias) sind zuerst zwischen die am Aufbau der Kelchwand beteiligten zwei proximalen BrBr kleine iBr eingeschaltet. Besonders häufig werden im Jura die Pentacrininae (Trias bis jetzt), in deren sehr kleinen Kelch zwei proximale BrBr eingeschlossen sind; die JBJB sind auf ein Minimum reduziert oder ganz atrophiert. Die meist unverhältnismäßig großen, ein- oder wechselzeiligen Arme sind vielfach verästelt, mit Pinnulis besetzt; der runde bis scharf pentagonale Stiel kann namentlich im proximalen Teil zahlreiche Zirren tragen.

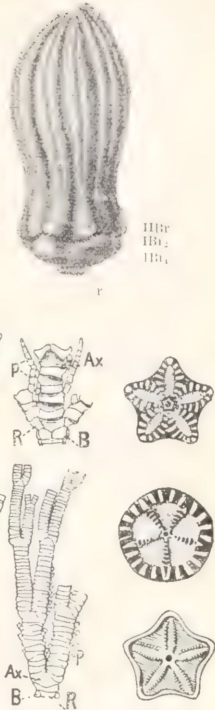


Fig. 47. Dicyclica Inadunata. Dendrocinoidea †distincta. †Encrinus liliiformis Mill. Mitteltrias, Muschelkalk: Braunschweig. Kelch mit groben Armen. r Radiale; IBr_1 u. IBr_2 Primibrachialia 1 u. 2; IIBr Sekundibrachialia, mit denen die 10 freien Arme beginnen.

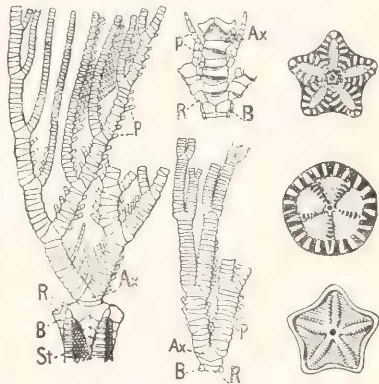


Fig. 47a. Dicyclica Inadunata. Dendrocinoidea articulata. Pentacrinidae. 1 †Pentacrinus (†Extracrinus) fossilis Blumb. (Briareus Mill.). Lias. Proximaler Stielteil St; Basis B; R Radialia mit distalem Spornfortsatz; Ax Axilläres Brachiale 2, p Pinnulae an den einseitig verzweigten Armästen. 2 Metacrinus Moseleyi, rezent; erst das 8. Primibrachiale ist axillär. 3 Isocrinus pendulus, rezent. Analyse des Kelchs und der isotom verzweigten Arme. 4 Isocrinus amblyscalaris, Gelenkfläche eines internodalen Stielglieds. 5 †Balanocrinus subteres Münst. sp. Oberjura, Oxford. Gelenkfläche eines internodalen Stielglieds. 6 †Pentacrinus fossilis Blumb. Gelenkfläche eines internodalen Stielglieds.

Analtafel). — 2 distale Armteile mit Seitenfortsätzen der Glieder, a lateral, b dorsal. — †Crotalocrinus pulcher His. Obersilur; Gotland. Kelchdecke mit den Anfängen der Arme. Die Zwischenräume zwischen den Seitenfortsätzen der Armglieder sind schwarz gezeichnet. ac Axialkanal; As Analröhre; cp Deckplättchen der Ambulakralrinnen vg; IR Interradius; M Madreporit; P Oralia; vBr_1 erstes Quintibrachiale. Aus Bather.

Fig. 46. †Cupressocrinus abbreviatus Gf. Mitteldevon; Gerolstein, Eifel. Kelch von der Oralseite mit „Konsolidationsapparat". amb Lücke für das Ambulakrum; as Anallücke; o Oralia um die große runde Mundlücke, durch die die Basis sichtbar ist; r Radialia mit weiten Achsenkanälen. Nach Quenstedt. Aus Stromer.

Teils nach der Ausbildung der Stielglieder und ihrer Gelenkfacetten, teils nach dem Bau der Arme sind mehrere Gattungen zu unterscheiden. In der Mitteltrias beginnt Isocrinus H. v. Mey., auf dessen Stielgliedern die krenulierten Grenzwälle der „Petala" breit sind, so daß ihre Ränder radial aneinanderstoßen; die Arme sind über dem zweiten axillären Br isotom geteilt. †Pentacrinus Blumb. s. str. = †Extracrinus Aust. (Rhät und Jura) hat ± pentagonale Stiele mit schmalen Petala, zwischen deren krenulierten Grenzwällen ± weite, glatte oder tuberkulierte radiale Felder liegen; die zehn über den axillären Br_2 einsetzenden langen Arme sind je nur auf einer Seite gegabelt, mit Pinnulis besetzt; in den Posidonomyenschiefern des oberen Lias Schwabens kommen Riesenformen vor mit Stielen bis zu 10 m Länge und mit „Kronen", die bis zu ½ m Durchmesser haben — die „Medusenhäupter Schwabens", wie Quenstedt sie beschrieb. †Balanocrinus Ag. (Trias-Eozän) hat ± runde Stiele mit krenulierten Rändern und fünf radialen schmalen krenulierten Leisten auf den Gelenkflächen. Bei Metacrinus Carp. (rezent) beginnt die Teilung der dichotom gegabelten Arme erst mit dem 5. bis 8. Br.

Bather zählt zu seinen „Articulata" auch die ungestielten †Uintacrinidae und †Marsupitidae der oberen Kreide. — †Uintacrinus Grinn. (Nordamerika, Nordwest-Europa) — nach Zittel „flexibil" — besitzt einen bis orangengroßen, sehr vieltäfeligen Kelch, in dessen meist monozyklischer Basis ein Zentrodorsale eingeschaltet ist. Zahlreiche BrBr, iBriBr und iBrII selbst noch Pinnularia und Interpinnularia sind in den Kelch eingeschlossen. Die zehn mit Pinnulis besetzten ungeteilten Arme sind sehr lang — bis 20 Kelchdurchmessern gleich. Bather sieht in †Uintacrinus eine Schwimmform, Jaekel hält ihn für sessillebend. Letzteres ist unwahrscheinlich: Auf manchen Schichtflächen des oberen Kreidemergels von Kansas liegen zahllose Individuen dichtgedrängt beieinander; so können sie unmöglich als Bodentiere existiert haben, die einzelnen Individuen müßten mit ihren langen Armen einander aufs empfindlichste behindert haben. — Marsupites J. S. Mill, nach Zittel „fistulat", aus der Schreibkreide Deutschlands und Englands, mit walnußgroßem Kelch, mit großem Zentrodorsale, großen JB und B und niedrigen R, hat schlanke, über Br2 dichotom geteilte Arme mit kurzen Pinnulis; zwischen den zwei proximalen Br, die nicht in die Kelchwand eingelagert sind, liegen kleine iBr. Bei dem massiveren Kelch und relativ sehr zarten Armen scheint für †Marsupites schwimmende Lebensweise ausgeschlossen.

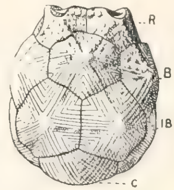


Fig. 49. †Marsupites testudinarius Schloth. sp. Oberkreide, Senon; England. Kelch. C Zentrodorsale; IB Infrabasalia; B Basalia; R Radialia mit Gelenkflächen für die relativ zarten über Primibrachiale 2 geteilten Arme. Aus Bather.

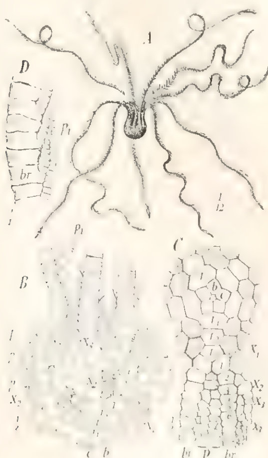


Fig. 48. †Uintocrinus socialis Grinn. Oberkreide; Kansas. A Rekonstruktion in Schwimmstellung. — B und C Kelchanalysen. b Basalia, c Zentrodorsale; r_1 Radialia; r_2 r_3 Primibrachialia; 1 bis 8 Sekundibrachialia; x_1 Interprimibrachialia; x_2 Intersekundibrachialia; x_3 Supplementarplatten (Interpinnularia); p Pinnularia; p_1 Pinnulae der freien Arme. — D freie Armglieder; br mit Pinnulis p_1. Nach Bather. Aus Steinmann.

Auch die rezenten Bathycriniden mit Bathycrinus und Rhizocrinus — sonst mit den Bourgeticriniden zu den „Articulata" Müllers gestellt, von Jaekel als „Costata" klassifiziert — rechnet Bather zu seinen dizyklischen Inadunaten.

2. Ordnung Flexibilia Bather (= paläozoische Flexibilia und meso-känozoische Articulata Zitt., Articulata W. u. Sp. non Müll.) Untersilur?, Obersilur bis jetzt (vgl. S. 406).

Nach dem Fehlen oder Auftreten von Pinnulis unterscheidet Bather zwei Gruppen, die paläozoischen †Impinnata und die meso-känozoischen Pinnata; bei beiden sind proximale Br auch iBr beweglich in die Kelchwand einbezogen; die Decke ist beweglich, mit ambulakralen und vielen interambulakralen Täfelchen: Mund und Ambulakralfurchen liegen auf der Decke und sind offen; die IB, oft verschmolzen, können bei alten Individuen atrophiert sein.

1. †Impinnata, Familien: †Ichthyocrinidae Obersilur-Karbon, †Gazacrinidae Obersilur, †Taxocrinidae Obersilur-Karbon, †Dactylocrinidae Obersilur-Karbon, †Sagenocrinidae Obersilur, Karbon.

Den †Ichthyocrinidae fehlen noch iBr, ihre meist dreimal isotom geteilten Arme liegen dicht aneinander. Bei †Ichthyocrinus Conr. (Obersilur-Karbon) fehlen auch interradiale Analia, die bei †Lecanocrinus Hall (Silur, Devon) deutlich vorhanden sind. †Mespilocrinus de Kon. (Unterkarbon) hat auffällig nach rechts umgebogene Arme. — Die †Gazacrinidae haben je ein iBr zwischen den proximalen Br. — Bei den †Taxocrinidae legen sich in der Kelchwand mehrere iBr zwischen die proximalen Br der mehrfach gespaltenen, einzeiligen Arme, deren untere Glieder einen abwärts gerichteten Gelenkfortsatz haben: †Taxocrinus Phill. (= Forbesiocrinus de Kon.) Silur-Karbon. †Homalocrinus Ang. Obersilur, †Anisocrinus Ang. Obersilur. — Die †Dactylocrinidae mit ± zahlreichen iBr in der Kelchwand haben heterotom verzweigte Arme: †Calpiocrinus Ang.

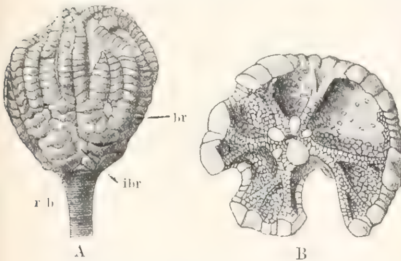


Fig. 50. Dicyclica; Flexibilia †Impinnata. A †Forbesiocrinus incurvatus Trautsch. sp. (?). Unterkarbon; Miatschkowo bei Moskau. b Basalia; r Radialia; ibr Interprimibrachialia, br Sekundibrachialia, zwischen ihnen Intersekundibrachialia. B †Taxocrinus intermedius W. u. Sp. Kelchdecke mit größerem analem Orale, mit verzweigten Ambulakra und sehr zahlreichen interambulakralen Täfelchen; Analröhre (rechts unten) ausgebrochen. Arme weggebrochen. Aus v. Stromer.

Obersilur, †Dactylocrinus Quenst. Obersilur-Devon, †Synerocrinus Jaek., †Onychocrinus Lyon und Cassed. Karbon. — Ob auch †Edriocrinus Hall (Devon), jung mit der hohen Basis festsitzend, später frei, ferner †Cleiocrinus Bill. (Untersilur) und †Rhopalocrinus W. u. Sp. (Devon) zu den †Impinnata gehören, ist ungewiß.

2. Bathers Pinnata entsprechen den „Articulata" Zittels. Ihre genetische Verbindung mit den †Impinnata steht nicht fest; möglicherweise sind sie aus distincten †Dendrocrinoideen (?†Encrinidae) herzuleiten. Familien: Apiocrinidae Trias-Unterkreide und jetzt, Bourgeticrinidae Kreide- bis jetzt, Antedonidae Jura — jetzt, Atelecrinidae Kreide (?)-jetzt, Actinometridae Lias bis jetzt, Thaumatocrinidae jetzt, †Eugeniacrinidae Dogger-Unterkreide und Eozän, Holopodidae Oberkreide bis jetzt, †Eudesiocrinidae Lias.

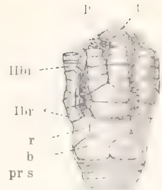


Fig. 51. †Apiocrinus Roissyi d'Orb. (Dicyclica; Flexibilia pinnata). Oberjura, Oxford; La Rochelle, Char. inf. Frankreich. Kelch mit proximalen Teilen des Stieles und der Arme. pr.s oberstes Stielglied, „Proximale"; b Basalia; r Radialia; Ibr, IIbr Primi- und Sekundibrachialia; p Pinnula; t feingetäfelte, hohe Kelchdecke. Nach de Loriol. Aus v. Stromer.

Die mono- bis kryptodizyklischen Apiocrinidae beginnen in der Trias (?) mit †Millericrinus d'Orb. (bis Unterkreide), bei dem teilweise Resorption des Stieles vorkommen kann; dieser und †Apiocrinus Mill. (Jura-Unterkreide) mit besonders massiven Kelchen und drehrunden Stielen, deren proximale Glieder sehr verbreitert sein können, und von welchen das proximalste auch als Zentrodorsale aufgefaßt wird, sind besonders im Jura recht häufig. Während iBr bei †Apiocrinus nur selten eingeschaltet sind, nehmen solche bei †Guettardocrinus d'Orb. (Oberjura) öfters in großer Anzahl an der Bildung der Kelchwand teil. †Acrochordocrinus Trautsch = †Mespilocrinus Quenst. Oberjura; Calamocrinus Ag. jetzt. — Bourgueticrinidae Kreide—Eozän, rezent, (vgl. S. 406). Der niedrige, monozyklische Kelch von †Bourgueticrinus d'Orb. (Jura?) Kreide-Eozän, ohne iBr ruht auf einem hohen Zentrodorsale; die Stielglieder sind mit grobem Gelenkriff versehen. †Mesocrinus Carp. Kreide. Rhizocrinus Sars Eozän bis jetzt. — Die Antedonidae (Zoologischer Teil S. 406) sind mit †Thiolliericrinus Etall. (BB auf ein Minimum reduziert, großes zirrentragendes Zentrodorsale; Jura-Kreide) und Antedon de Frém. = Solanocrinus Gf. (seit Lias) bis in den unteren Jura zurückzuverfolgen. — In der Kreide setzen die Atelecrinidae ein (s. S. 406) und die Actinometridae sind mit Actinometra Müll. seit dem Lias bekannt. — Vom Mitteljura bis Alttertiär sind die †Eugeniacrinidae zu verfolgen mit zierlichem, auf kurzem, meist drehrundem, hochgliedrigem Stiel sitzendem Kelch aus 5 (4?) fest verwachsenen großen R R, welche die Basis vollständig unterdrückt haben; Br_1 niedrig, Br_2 hoch, axillär, aus seitlichen Einschnitten geht jederseits ein Aermchen ab. †Eugeniacrinus Mill. Dogger-Unterkreide, zahlreiche Verwandte im Oberjura und Unterkreide, †Formocrinus Jaek. im Eozän. — Die Holopodidae beginnen in der Oberkreide mit †Cyathidium Steenstr. (bis Miozän). Holopus d'Orb. ist tertiär und lebend. — Die †Eudesicrinidae mit †Eudesicrinus P. de Lor. und †Cotylederma Quenst. (Lias) sind unvollkommen bekannte, festsitzende Formen ungewisser Stellung; bei ersterem ruhen 5 R R auf einer aus verschmolzenen B B oder proximalen Kolumnalien bestehenden Säule.

3. Ordnung †Dicyclica Camerata (†Camerata W. u. Sp. e. p.). Als eine parallele Entwickelung zu den monozyklischen †Ca-

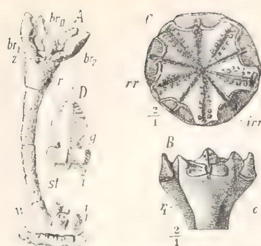


Fig. 52. †Eugeniacrinus caryophyllatus Schloth. Oberjura, Oxford; Franken. A Rekonstruktion; nach Jaekel und Bather. (W Wurzel; st Stiel; r verwachsene Radialia; br_1 niedriges Primibrachiale; br_2 zweites, axilläres Primibrachiale; brII Sekundibrachialia, freie Aermchen; z Gelenkfläche für br_2.) — B Radialia von außen (c Axialkanal). — C Radialia von oben (irr, rr interradiale und radiale Rinnen). — D axilläres Primibrachiale (von innen) mit den Gelenkfacetten für die Aermchen. Aus Steinmann.

meraten faßt Bather eine kleinere Zahl dizyklischer Cameraten des Paläozoikum auf, welche aus dizyklischen Inadunaten entstanden sein mögen, und die sonst in ihrem ganzen Bau monozyklischen Cameraten z. B. auch in bezug auf die feste Kelchdecke vollkommen gleichen. Familien: †Reteocrinidae Untersilur, †Dimerocrinidae Untersilur-Devon, †Lampterocrinidae Obersilur, †Rhodocrinidae Untersilur-Karbon.

Die †Reteocrinidae ähneln äußerlich sehr den monozyklischen †Xenocriniden, haben aber zahlreichere, unregelmäßiger angeordnete Täfelchen in den Interradien und zwischen den Armteilungen; die ein- bis wechselzeitigen mehrfach geteilten Arme tragen Pinnulae. †Reteocrinus Bill. Untersilur. — Die †Dimerocrinidae haben zwischen den RR eine interradiale Platte eingeschaltet und zwischen den BrI und BrII der Kelchwand ± zahlreiche iBr. †Dimerocrinus Phill. Obersilur, mit zweigeteilten, zweizeiligen Armen; †Ptychocrinus W. u. Sp. Untersilur, mit einzeiligen zweimal geteilten Armen; †Orthocrinus Jaek. Devon, mit kräftigen, einzeiligen, einmal gespaltenen und vom ersten axillären Br an freien Armen. †Cyphocrinus S. A. Mill. mit herabhängenden, kräftigen zweizeiligen, wenigstens einmal geteilten Armen, Obersilur. — Der Kelch der †Lampterocrinidae ähnelt dem der †Dimerocrinidae, aber in der festen Kelchdecke wird eine Analröhre ausgebildet. †Lampterocrinus F. Roem., †Siphonocrinus S. A. Mill. Obersilur. — †Rhodocrinidae; zahlreiche dizyklisch camerate Gattungen des Untersilur bis Karbon zeigen zwischen allen RR je eine interradiale Platte, über der besonders im analen Interradius ± zahlreiche iBr in der Kelchwand folgen, an deren Aufbau mindestens zwei Kreise von Br teilnehmen. Die bis 30, verzweigten oder unverzweigten Arme werden zweizeilig und tragen lange Pinnulae. Von den vielen Gattungen (†Rhaphanocrinus, †Archaeocrinus, †Diabolocrinus W. u. Sp. Untersilur; †Anthemocrinus W. u. Sp., Obersilur; †Thylaeocrinus, †Diamenocrinus Oehl., †Rhipidocrinus Beyr. Devon; †Rhodocrinus J. S. Mill. Karbon; †Gilbertsonocrinus Phill. Devon-Karbon u. a. m.) ist besonders †Rhipidocrinus im Devon Europas häufig.

Die Geschichte der Crinoideen spielte sich — vorausgesetzt, daß Bathers phyletisch-systematische Auffassung dem tatsächlichen Gange gerecht würde — so ab, daß im Untersilur zwei gleichwertige Stämme inadunate Mono- und Dicyclica nebeneinander stehen und bis heute getrennt fortdauern, wobei allerdings die Verbindung meso-känozoischer Typen mit paläozoischen in beiden Stämmen nicht über jede Frage sicher ist. Beide geben im Untersilur oder schon früher (?) †camerate Seitenstämme ab, in dem ± viele Br und iBr fest in die Kelchwand eingeschaltet werden, während eine festgewölbte Kelchdecke produziert wird; beide camerate Aeste überdauern das Paläozoikum nicht, die dizyklischen sterben sogar etwas früher (?) aus als die monozyklischen. — Im Obersilur geben die monozyklischen Inadunaten einen zweiten Seitenstamm ab, die †Adunata, welche ebenfalls nicht über das Paläozoikum hinaus zu verfolgen sind; in diesen †Adunaten sind manche Konvergenzen zu dizyklischen Inadunaten zu erkennen (†Platycrinidae — †Crotalacrinidae). — Die dizyklischen Inadunaten geben im Obersilur die †impinnaten Flexibilia ab, denen im Mesozoikum die pinnaten Flexibilia (wieder ohne sicheren genetischen Zusammenhang) folgen, welche allein heute in etwas größerer Zahl von Typen erhalten sind, und die bis zu gewissem Grade durch die losere seitliche Verbindung der proximalen Brachialia den meso-känozoischen „artikulaten" dizyklischen Inadunaten konvergent sind.

Die Blütezeiten der Crinoideenentfaltung fallen ins Paläozoikum — vom Obersilur bis ins Karbon. Auffälliger Rückgang ist (oder scheint) im Perm[1]) zu bemerken; vom Mesozoikum bis heute sind es nur verhältnismäßig wenige Gattungen, die wir kennen.

Geologische Bedeutung der Crinoideen. Eine beachtenswerte Rolle spielen die Crinoideen als Gesteinsbildner: im Obersilur, Devon, im Karbon, dann noch wieder in der Trias und im Jura sind Crinoideenkalke, „Trochitenkalke" keine seltenen Erscheinungen. Die Crinoideen verhielten sich dabei wie die riffbildenden Korallen und Hydrozoen, sie bevorzugten klares und flaches Wasser. Meeresteile, in welche terrigener Schlamm in größeren Quantitäten eingeschwemmt wurde, mieden sie und mußten sie meiden; vgl. z. B. das Verschwinden der „Trochiten" im Muschelkalk, sobald toniges Sediment überhandnimmt.

Vereinzelt waren sie an planktonisches

[1]) Aus dem Perm Australasiens wird neuerdings von großem Reichtum an Crinoideen durch J. Wanner berichtet.

Leben angepaßt: die „†Camarocrinus"-Formen des Silur (S. 000). Andere mögen pseudoplanktonisch gelebt haben: die an verkohlten Holzstämmen gefundenen †Pentacrinusformen aus dem Posidonomyenschiefer des oberen Lias Württembergs.

Nur selten kennt man aus der Vorzeit Crinoideenreste in Gesteinen, die auf tieferes, küstenferneres Meer hindeuten, wie in den unterdevonischen Schiefern von Bundenbach und in der Vergesellschaftung von hexaktinelliden Schwämmen im unteren Malm Süddeutschlands (wo allerdings die Annahme erheblicherer Meerestiefen aus geologischen Gründen anfechtbar ist). Das ist auffallend. Heute bewohnen die Crinoideen mit Ausnahme der Antedoniden und Actinometriden durchweg Meeresräume von größeren Tiefen. Es liegt nahe, eine erst späte Abwanderung in größere Tiefen, etwa seit dem Mesozoikum anzunehmen.

II. Unterstamm **Echinozoa**. 1. Klasse Echinoidea. Ueber die Organisation und den Skelettbau der Echinoidea vgl. S. 420.

Seeigel, die heute weitaus häufigsten der Echinodermen, sind fossil seit den Zeiten des Untersilur bekannt. Doch erst seit der Zeit des mittleren Jura (dann namentlich aus Kreide und Tertiär) ist uns eine größere Menge differenterer Formen überliefert, welche sich ± enge an die heute zu unterscheidenden Typen anlehnen, und deren Ahnenreihen wenigstens auf einzelnen Linien (Cidaroida, Diadematina) sich bis ins Perm zurückleiten lassen. Im Paläozoikum sind Seeigel Seltenheiten; nur aus dem Karbon ist eine etwas ansehnlichere Zahl von ihnen bekannt. Und für die paläozoischen Typen wird es — da ihre Coronae (mit ganz wenigen Ausnahmen im Perm) noch nicht die Konstanz von 20 Täfelchenreihen erlangt haben — unmöglich, sie ohne weiteres in die systematischen Einheiten der mesozoischen und jüngeren Seeigel einzureihen. Dem wird meist dadurch Ausdruck gegeben, daß man die paläozoischen †Palechinoidea (und die triadischen †Tiarechinidae) den meso-kaenozoischen Euechinoidea gegenüberstellt. Gegen solche Trennung wird neuerdings mehrfach Front gemacht (siehe Seite 430) doch nur zum Teil mit Recht. Die Mehrzahl der paläozoischen Typen läßt sich in der Tat nicht mit meso-kaenozoischen in bestimmte Verbindung bringen, und über die etwa möglichen Verbindungswege altertümlicher mit den modernen Typen herrscht Unsicherheit oder Unstimmigkeit. So will R. T. Jackson zum Teil auf ontogenetischer Grundlage die regulären Cidaroida (Perm bis jetzt) — d. h. doch wohl die Grundmaße aller modernen Typen — als direkte Abkömmlinge der ältesten und sonst ganz isoliert stehenden untersilurischen Gattung †Bothriocidaris aufgefaßt wissen. Sonst werden die Cidaroida jetzt gewöhnlich als Nachkommen der ihnen in vielen morphologischen Momenten nahestehenden †Archaeocidaridae (Devon-Perm) mit mehr als 2 interambulakralen Tafelreihen angesehen. Hiergegen betont Jackson, daß in der Ontogenie der lebenden Seeigel nirgend wo Anzeichen für die Reduktion der Zahl interambulakraler Tafelreihen zu finden seien, daß vielmehr für die Anlage der Interambulakra das Vorkommen nur einer Platte am Ventralrande der Korona die Regel sei. Ob diesen Beobachtungen Jacksons ausschlaggebender Wert für die Phylogenie der Seeigel beizulegen ist, bleibt eine noch offene Frage.

Unter Verwertung des fossilen Materiales lassen sich die Seeigel in die folgenden „Ordnungen" bringen. 1. Cystocidaroida; (Reguläre Seeigel) 2. †Bothriocidaroida, 3. †Perischoechinoida, 4. †Plesiocidaroida, 5. Cidaroida, 6. Diadematoida; (Irreguläre Seeigel) 7. Holectypoida, 8. Clypaeastroida, 9. Cassiduloida, 10. Spatangoida.

1. Ordnung †Cystocidaroida, Obersilur.

Als große Seltenheiten wurden im Obersilur Englands Reste von äußerlich regulären Seeigeln (aber mit exzentrisch interambulakral liegendem After und Madreporiten) ohne apikales Plattensystem gefunden. Die breiten Interambulakra werden von sehr zahlreichen, unregelmäßig polygonalen, nicht in Vertikalreihen geordneten Täfelchen gebildet. Die zum zentralliegenden Munde (mit Kiefergebiß) ziehenden bandförmigen Ambulakra sind schmal, mit 2 oder 4 Reihen niedriger Täfelchen, von denen nur die aboralen von Poren durchsetzt sind, während in der Nähe des Mundes die Podia durch die Suturen der Täfelchen austraten. Das Kelchskelett war beweglich (?), mit kleinen Stacheln besetzt. †Cystocidaris Salt. (†Echinocystis W. Th.), †Palaeodiscus Salt. — Die ganz isoliert stehenden Formen erinnern flüchtig an †Edrioasteroideen, aber die Lage des Mundes mit Kiefergebiß, die subtegminale Lage der Ambulakralstämme sind doch scharf trennend, wennwohl an irgendeinen — weit zurückliegenden Zusammenhang gedacht werden könnte (M. Neumayr 1889).

Reguläre Seeigel, Endocyclica.

2. Ordnung †Bothriocidaroida, Untersilur.

Nur in 4 Stücken (2 Arten) ist die vollkommen isoliert stehende Gatt. †Bothriocidaris Eichw. aus dem Untersilur Estlands bekannt. Im kleinen regulären Kelch liegen das vieltäfelige Periprokt wie die Mundlücke (mit Spuren eines Kiefergebisses?) zentral. In den Interambulakra liegt nur je eine Tafelreihe, die die Mundlücke [illegible] erreicht. Zwei Reihen alternierender, [illegible] Täfelchen bilden die Ambulakra; in [illegible] stehen die 2 Ambulakralporen auffallenderweise über-, nicht nebeneinander, aktinal endigen diese

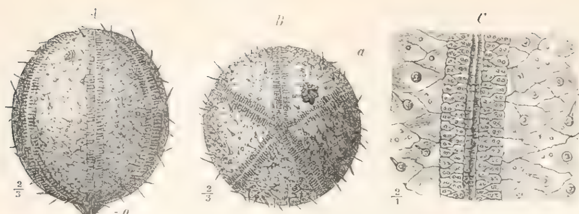


Fig. 53. A bis C. †Cystocidaris (†Echinocystis) pomum W. Th. Obersilur; Leintwardeine Schottland. A und B rekonstruiert: A von der Seite, B aktinal. C Ambulakrum und benachbarte Interambulakralregion vergrößert. a Afterlücke; o Mund mit Kiefergebiß. Aus Steinmann.

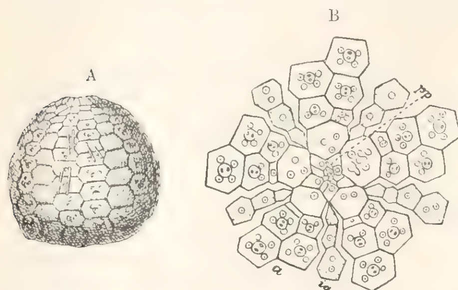


Fig. 54, A, B. †Bothriocidaris Eichw. Untersilur; Estland. A †B. Pahleni Fr. Schmidt, von der Seite, 2mal vergrößert. Nach Fr. Schmidt. — B †B. globulus Eichw. Schema der Scheitelregion. a Ambulakraltafeln mit untereinander stehenden Poren, die von Stachelwärzchen umgeben sind; ia Interambulakra; pp Täfelchen des Periprokt. Nach Jaekel. Beides aus v. Stromer.

Reihen mit je einer großen Terminalplatte. Die Kelchtafeln sind mit kleinen Warzen und Stacheln besetzt.

3. Ordnung †Perischoechinoida. Obersilur bis Perm.

Reguläre Seeigel mit 2 bis 20 Tafelreihen in den Ambulakren und 3 bis 14 in den Interambulakren. Die Tafeln sind imbrizierend verschiebbar oder bilden eine starre Korona; sie tragen Warzen und Stacheln oder sind glatt.

(1) Unterordnung †Melonitina. Ambulakra mit 2 bis 20, Interambulakra mit 3 bis 13 Tafelreihen. Tafeln glatt bis feinwarzig, eine feste Korona bildend, seltener imbrizierend. Fam. †Palechinidae (†Melonitidae) mit 2 bis 12 Amb. und 3 bis 13 Amb., nicht imbriziert; Obersilur-Unterkarbon; †Palechinus M'Coy, Amb. mit 2 Tafelreihen aber in jeder zweiten Reihe von Porenpaaren auf alternierenden keilförmigen Halbtäfelchen. †Rhoechinus Keep. Amb. mit 2 Tafelreihen und miserial geordneten Porenpaaren. †Maccoya R.T.J. †Lovenechinus R.T.J., †Melonites Norw. u. Ow. und †Oligoporus M. u. W. mit 4 bis 10 Tafelreihen in den meist ± eingesenkten Ambulakren (Karbon).

(2) Unterordnung †Lepidestheina. Familie †Lepidestheidae mit imbrizierten interambulakralen Tafeln, bis 20 ambulakrale Reihen können auftreten; Devon-Karbon. †Lepidesthes W. u. W., †Pholidocidaris M. u. W.

(3) Unterordnung †Archaeocidarina (†Lepidocidarina). Ambulakra schmal, zweireihig, Interambulakra mit 4 bis 14 Reihen mit Warzen und Stacheln besetzten, an schrägen Nähten imbrizierenden Tafeln und zwar so, daß sie (meist) periproktwärts, und die adambulakralen über die Ambulakra geschoben werden können. Mundlücke mit Peristomtäfelchen und Kiefergebiß (ohne Aurikeln), Devon-Perm. —

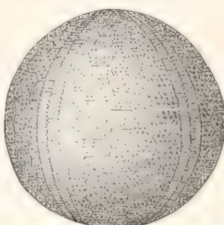


Fig. 55. †Palechinus elegans M'Coy. Unterkarbon. Irland. Nach Bailey. Aus Steinmann.

Familie †Archaeocidaridae. Vom Habitus der Cidaroida, aber Interambulakra mit 1 bis 8 Reihen sechs- und fünfseitiger Tafeln, je mit einer großen, weit gehöften Stachelwarze und mit groben Primärstacheln. †Eocidaris Des. Devon-Perm; †Archaeocidaris M'Coy Karbon; †Lepidocidaris M. u. W. Karbon.

Fam. †Lepidocentridae. JAmb. mit 5

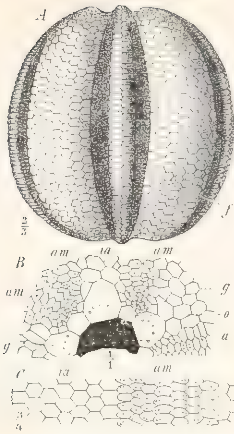


Fig. 56. †Melonites multiporus Norw. a. Ow. Unterkarbon; St. Louis, Missouri. A von der Seite, B Scheitelregion, C Schema eines ambulakralen und interambulakralen Feldes. am Ambulakraltafeln; g Genitaltafeln; f Furchen in den Ambulakralregionen; ia Interambulakraltafeln; o Ocellar-(Terminal-)Tafeln. Aus Steinmann.

bis 14 Reihen vierseitiger, imbrizierender mit zahlreichen Warzen und feinen Stacheln besetzter Tafeln, Amb. zweireihig. Obersilur bis Unterkarbon. †Lepidocentrus Müll. Devon; †Hyattechinus R.T.J. Obersilur; †Koninckocidaris Dollo u. Buiss., Karbon; †Leptechinus Tornq. Karbon. (Die Vereinigung dieser 3 Unterordnungen zu einer Ordnung ist nicht genügend sicher gestellt.)

4. Ordnung †Plesiocidaroida.

Wenige, ganz isoliert stehende, reguläre kleine Formen der alpinen Trias mit unverhältnismäßig großem Apikalschild; im Interambulakrum über einer adoralen 3 oder 2 und 3 nebeneinander stehende hohe Tafeln; Ambulakra zweireihig mit einfachen Tafeln; Tafeln mit Warzen. †Tiarechinus Neum., †Lysechinus Greg. (Die formähnliche rezente Arbaciine (?) Pgymaeocidaris kann mit den triadischen Formen verwandt sein.)

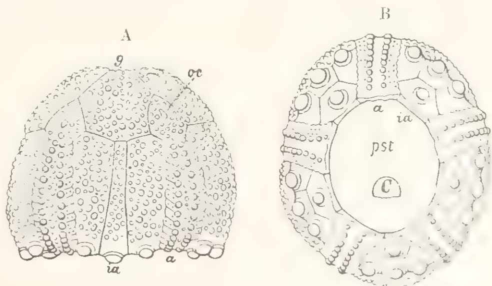
5. Ordnung Cidaroida (vgl. Seite 431).

Mit der kleinwüchsigen †Miocidaris Död. (Bath). — Perm, Trias — setzen die um Cidaris Leske (Jura bis jetzt) sich ordnenden, sehr zahlreichen Gattungen ein (die ? Nachkommen der †Bothriocidariden oder †Archaeocidariden), in deren Korona bei je 5×2 amb. und interambulakralen Täfelchen die adambulakralen Ränder der JAmb. bei den permischen und triadischen Gattungen †Miocidaris, †Triadocidaris Död., †Anaulocidaris Zitt. noch schräge über die Amb. greifen, so daß anfangs noch keine volle Festigung der Korona herrscht. Bei den ältesten Formen verlaufen die schmalen Amb. noch gerade, dann schon bei den meisten jurassischen geschlängelt. Bei †Tetracidaris Cott. (Unterkreide) stellen sich in einiger Entfernung unterhalb des Scheitels in den JAmb. 4 statt 2 Reihen von Täfelchen ein.

6. Ordnung Diadematoida (vgl. Seite 431).

Im Perm beginnt mit †Hypodiadema Ag., einer Form mit noch gerade bleibenden Amb. und mit gleichgroß bleibenden Warzen auf ihnen, die besonders in Oberjura, Kreide und Tertiär ungemein reich entfaltete Unterordnung der Diadematina mit in der Nähe des Mundes gehäuften Porenpaaren der Amb. Diesen werden durch die Pedinide †Pedinothuria Greg. der jurassische †Pelanechinus Keep. und †Echinothuria S. P. Woodw. aus der Oberkreide angeschlossen, welche wie die rezenten Asthenosoma, Phormosoma u. a. durch verschiebbare Tafeln in der Korona ausgezeichnet waren. Die ebenfalls im Oberjura und Kreide häufigeren Saleniina werden in der jüngeren Trias durch †Eodiadema Dunc. (bis Lias) eingeleitet; ihnen folgen dann im Tertiär die Arbaciina. Die heute und seit dem Tertiär äußerst formenreiche Unterordnung der Echinina mit Großtäfelchen im ganzen Bereich der Amb. beginnt im Jura mit Formen wie †Stomechinus Des., †Pseudopedina Cott. †Phymechinus Des.

Fig. 57, A bis C. †Tiarecrinus princeps Neumayr. Obertrias; St. Cassian, Südtirol. A von der Seite, B von unten, C natürliche Größe. a Ambulakrum; g Genitaltafel; oc Ocellar-(Terminal-)Tafel; pst Mundlücke. Nach Neumayr und Lovén. Aus v. Stromer.



(Irreguläre Seeigel, Exocyclica.)

Die viel behandelte Frage nach dem Ursprung der „Irregularia", welche Steinmann mit den †Blastoideen verbinden zu können glaubte, ist unter Hilfe des fossilen Materials heute doch so der Antwort nahe gebracht, daß die Wurzeln der Irregulären in den Diadematiden gesucht werden müssen. M. Neumayr betonte bereits 1889 die Bedeutung, von †Acrosalenia Ag. in diesem Sinne mit der dort beginnenden Abwanderung des Afters aus dem Scheitelschilde. Im übrigen mag das Werden der Irregularia aus Regularia sehr wohl auf mehreren Wegen vor sich gegangen sein.

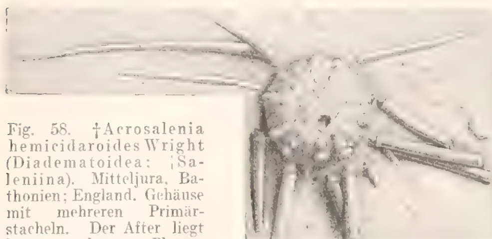


Fig. 58. †Acrosalenia hemicidaroides Wright (Diadematoidea; †Saleniina). Mitteljura, Bathonien; England. Gehäuse mit mehreren Primärstacheln. Der After liegt hinter mehreren Platten exzentrisch, nahe dem Rande im Scheitel. Nach Wright. Aus v. Stromer.

Die primitivsten Irregularia muß die gnathostome

7. Ordnung Holectypida (Jura bis jetzt). Figuren 59 und 60

umfassen, mit bandförmigen Ambulakren. Mit den recht different gebauten †Pygaster Ag. (mittlerer Lias bis Kreide; mit großer, dicht hinter dem Scheitel liegenden Afterlücke) und †Holectypus Des. (Unterer Dogger bis Kreide; mit der Afterlücke auf der Unterseite nahe am Peristom) setzen sie ein und existieren bis heute (Pygastrides Lov.) . In wenigen Gattungen waren sie in der Kreide (†Discoidea Klein, †Echinoconus Breyn), im Tertiär vorhanden (†Hypoclypeus Pom.), wo sich ihnen der sehr großwüchsig werdende Typus †Conoclypeus Ag. mit subpetaloiden Amb. anschloß. (Echinoconus zeigt bereits den Verlust des Kiefergebisses eingeleitet.)

In der Kreide schließt sich an die Holectypidae durch die Fibulariidae (?) die

8. Ordnung Clypeastroida an (siehe Seite 432).

Gnathostome Formen mit petaloiden oder subpetaloiden Ambulakren mit Gattungen, welche zumeist noch heute existieren.

Ob die atelostome und asternate

9. Ordnung Cassiduloida (siehe Seite 432, Fig. 61 und 62)

mit den ältesten Formen †Galeropygus Cott. im Lias und †Pyrina Desm. und †Hyboclypeus Ag im Dogger – von den Holectypidae herzuleiten ist oder aus einer besonderen, in den Diadematoida liegenden Wurzel, ist noch nicht entschieden. Zahlreiche Gattungen in Jura, Kreide und Tertiär.

10. Ordnung Spatangoida (vgl. Seite 433, Figuren 63, 64 und 65).

Diese heute reichst vertretene Ordnung beginnt im Mitteljura mit den prosternaten †Collyritidae: ± eiförmigen Seeigeln mit geraden, langen, bandförmigen Ambulakren, mit lang „zerrissenen" Scheitelschild, mit am Hinterrande liegendem After; †Collyrites Desm., †Dysaster Ag. und †Metaporhinus Mich. Juta-Unterkreide. Ihr etwaiger Zusammenhang mit den Holectypidae ist noch nicht sicher gestellt, und ebensowenig ihre Verbindung mit den meridosternaten †Ananchytidae (und den diesen verwandten Familien der Urechinidae, Calymnidae und Pourtalesiidae). Namentlich in der jüngeren Kreide waren die Ananchytidae weit verbreitet: †Ananchytes Leske, †Holaster Ag., Hemipneustes Ag.; ihr

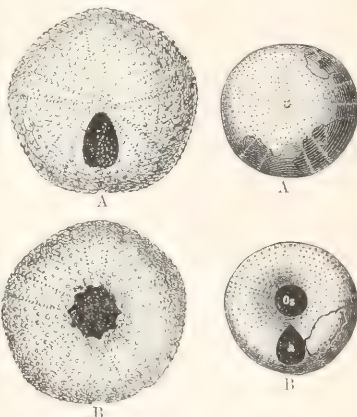


Fig. 59. Fig. 60.

Fig. 59, 60. Holectypoida.

Fig. 59 A, B. †Pygaster umbrella Ag. Oberjura, Oxford; Chatillon, Frankreich. A Oberseite mit großer Madreporentafel im Scheitel und großer Afterlücke; die hintere Genitaltafel fehlt. B Unterseite. Nach Cotteau. Aus v. Stromer.

Fig. 60 A, B. †Holectypus orificatus Schloth. Oberjura, Oxford; Streitberg, Bayern. A Oberseite, B Unterseite. Os Mundlücke, a Afterlücke. Aus v. Zittel.

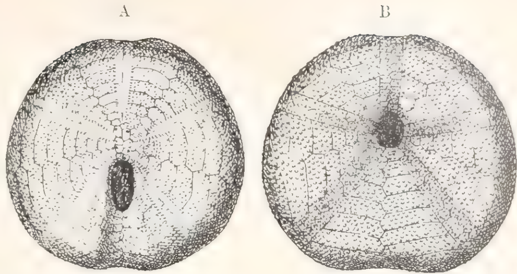


Fig. 61, A, B. †Hyboclypeus gibberulus Ag. (Carsiduloida, Echinoneidae). Mitteljura; Frankreich. a Oberseite, b Unterseite mit wenig nach vorn gerücktem Mund. Vgl. die Konvergenz mit dem Holectypiden †Pygaster, S. 486 Fig. 59. Nach Cotteau. Aus v. Stromer.



Fig. 62. †Pygurus rostratus Ag. (Cassiduloida, Cassidulidae, Echinolampinae). Unterkreide, Neokom; Schweiz. Unterseite mit grober Floszelle und den zentralen Mund. Nach de Loriol. Aus v. Stromer.



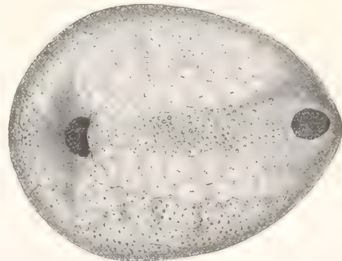


Fig. 64, A, B. †Ananchytes (†Echinocorys) ovata Lecke (Spatangoida, †Ananchytidae). Senone Schreibkreide; Coesfeld, Westfalen. A von der Seite, B von unten. Mund vorn, queroval; After dicht unter dem Hinterrand. Aus v. Stromer.



Fig. 63. †Collyrites elliptica Desm. (Spatangoida, †Collyritidae). Mitteljura, Callovien; Mamers, Sarthe. Frankreich. Oberseite mit zerrissenem Scheitel; die Ambulakra in Trivium tr und Bivium bi geordnet (bi in der Zeichnung auf der Afterlücke). Aus v. Zittel.

kompaktes bis wenig gestrecktes Scheitelschild macht es wahrscheinlich, daß sie wohl auf besonderer Linie — über wie †Echinoconus atelostomat werdende Formen — aus dem †Holectypidae entstanden sein mögen. Wohl sicher aus den †Ananchytidae (†Holaster?) wurden die amphisternaten Spatangidae (Kreide bis jetzt), mit den vielfach auftretenden Fasziolensystemen und dem großen Sternum, die spezialisiertesten aller Seeigel, von äußerlich ausgeprägtester Anpassung an im Bodenschlamm des Meeres wühlende Lebensweise und an das Schlammfressen (Hemipatagus, Spatangus). Besonders seit der jüngeren Kreide sind die Spatangiden in gewaltiger Formenmenge vorhanden, und heute lassen sie sowohl die asternaten irregulären Seeigel wie die regulären (Diadematoiden, Cidaroiden) an Zahl weit hinter sich.

Das geologische Vorkommen der Seeigel läßt im allgemeinen bei den heute

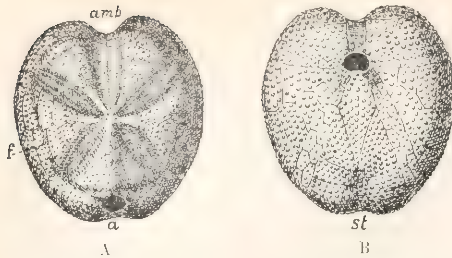


Fig. 65, A, B, Hemiaster †Meslei Per. u. Gauth. (Fam. Spatangidae). Oberkreide, Cenoman: Batna, Algier. A Oberseite, B Unterseite. a After; amb vorderes, vertieftes, bandförmiges Ambulakrum; f Fasciola peripetala; st Sternum. Aus v. Stromer.

lebenden die Bevorzugung von Flachseebildungen erkennen; dabei ist der Einfluß differenter Fazies und damit abgeänderter Lebensweise auf die Versteifung der Gehäuse, die Anordnung der Ambulakralporen, die Besetzung mit Stacheln und schließlich auch auf die äußere Form recht deutlich erkennbar: vergleiche die Gegensätze der in stillem tieferem Wasser lebenden Echinothuriden mit leicht deformierbarem lockerem Skelett, zu dem auf felsigem Boden lebenden Cidariden mit ungemein fester Korona und mächtigen Stacheln, zu den dünnschaligeren, häufig als Schlammwühler lebenden Spatangiden von Herzform und mit von feineren Stacheln wie von dichten dicken Borsten besetzter Schale.

2. Klasse Holothurioidea (vgl. Seite 407). Figur 66. Naturgemäß kann von Holothurien nur wenig fossiles Material erwartet werden. Bis vor kurzem kannte man auch nicht mehr als isolierte Kalkkörperchen — Anker, Rädchen, löcherige Plättchen — aus der Lederhaut vorzeitlicher Formen, die auf Synaptidae (Chirodota, Synapta, Myriotrochus) bezogen wurden, also auf Paractinopoda (im älteren Tertiär des Mainzer und Pariser Beckens). Unsicherere Reste sind auch aus dem marinen Karbon Englands, dem süddeutschen Jura, der Oberkreide Böhmens beschrieben worden.

Ueberraschend ist darum die Entdeckung von Ch. D. Walcott, welcher im mittelkambrischen Schiefer beim Burgeß-Paß, Brit.-Kolumbia, der Quelle bereits so vielen des Unerwarteten, mehrfach Spuren von Körpern fand, die auf Holothurioideen zurückzuführen sind. Walcott erkennt in diesen Körpern sowohl Paractinopode Synaptidae (†Mackenzia Walc.) als auch actinopode Holothuriidae (†Laggania Walc.), ?Elpidiidae (†Louisella Walc.) und den Typus einer besonderen Familie †Eldoniidae (†Eldonia Walc.). Bei letzterer, scheibenförmiger (also freischwimmender?) Form sind auffallend klar Organisationsdetails erhalten: der spiral gekrümmte Darm, ein zentrales Wassergefäß mit zahlreichen Radiärkanälen, Spuren der Muskulatur u. a.

Durch die Entdeckung Walcotts wird der Holothurienstamm in seinen beiden Hauptästen als sehr alt erwiesen, als dem

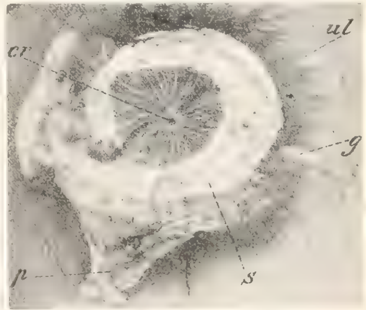


Fig. 66. †Eldonia Ludwigi Walc. Flachgedrücktes Individuum (etwas verkleinert) auf einer Schichtfläche des mittelkambrischen Burgeß-Schiefers (Burgeß-Paß, Brit.-Kolumbien). cr zentraler Ringkanal mit Radiärkanälen; g Gonade; p und ul Lappen der Umbrella; s Darm. Aus Walcott.

geologischen Vorkommen nach gleichalterig mit den pelmatozoen †Edrioasteroideen und †Carpoideen.

III. Unterstamm **Asterozoa**. Wenn hier die Asteroidea, Ophiuroidea und die †Auluroidea Schöndorfs als „Asterozoa“ zusammengefaßt sind, so wird damit nur einem Brauche der Paläontologen gefolgt, ohne daß dadurch die — schwer beweisbare — Annahme direkter genetischer Zusammengehörigkeit ausgedrückt werden soll.

Für die Charakteristik der Asteroidea und Ophiuroidea, namentlich bezüglich des Baues des für die Bestimmung des fossilen

Materiales wichtigsten Armskeletts vgl. S. 435ff. und 447ff.

Zu den gewöhnlich unterschiedenen Klassen der Asteroidea-Seesterne und Ophiuroidea-Schlangensterne, hat neuerdings F. Schöndorf eine dritte gefügt, die nur fossil, nur aus dem Paläozoikum bekannten †Auluroidea, vgl. Fig. 68 bis 71. Der äußeren Form nach wurden die in letzteren vereinigten Typen teils als Seesterne (†Encrinasteriae Bronn e. p.), teils als Schlangensterne (†Lysophiurae Greg. und Streptophiurae Bell e. p.) aufgefaßt. Die Arme besitzen keine Rücken-, Seiten- und Bauchschilder; sie sind nur aus 2 Reihen unverwachsener Ambulakralia und 2 Reihen von Adambulakralien aufgebaut, welche oben, lateral und (die Adambulakralia) ventral mit Stacheln und Körnern besetzt sein können. Die freien, gegen- oder wechselständigen Ambulakralia sind von der Dorsalseite ± rechteckig, ventral mit einem lateral gerichteten Zapfen versehen („stiefelförmig" Gregory). Seitlich stoßen an sie (mit ihnen gegenständig liegende) höhere massive Adambulakralia, welche ventral einen auf den Zapfen der Ambulakralia gerichteten gleichen Fortsatz besitzen. Diese Zapfen, umschließen ventral ± tiefe, ovale Gruben, aus denen die Ambulakralfüßchen treten. Das Ambulakralgefäß verläuft in einem ringsum geschlossenen Rohr zwischen den Ambulakralia. Durch kurze Seitenkanäle — teils zwischen je 2 Ambulakralia, teils deren distale Teile durchbohrend — treten die Seitenzweige des Ambulakralgefäßes in die Gruben resp. in die ventral offenen Armfurchen. Die größere oder (meist) kleine Körperscheibe mit konkaven Seitenrändern kann von Randplatten, die nie auf die Arme übergreifen, umsäumt sein oder nicht (phanerozone und cryptozone Formen). Ein interradialer Madreporit liegt auf der Ventralseite. Die fundamentale Differenz im Armbau berechtigt zur Abtrennung der †Auluroiden von den Asteroiden und Ophiuroiden.

1. Klasse Asteroidea Seesterne.

Echte fossile Seesterne kennt man — als Seltenheiten — seit dem jüngeren Kambrium (†Palaeaster Hall?). Etwas reichlichere Funde sind aus — und eigentlich nur aus — dem Devon besonders des rheinischen Schiefergebirges (Dachschiefer von Bundenbach) bekannt. Hieraus und vereinzelt aus dem Silur kennt man die **Phanerozonia**: †Palaeaster Hall, †Xenaster Simonow., †Spaniaster, †Rhenaster, †Eifelaster, †Agalmaster Schöndorf. Aus dem Muschelkalk: †Trichasteropsis Eck. Wieder etwas zahlreichere Formen lieferten Jura und Kreide: Pentaceros Linck, Leptaster Lov., Luidia Forb., die scheibenförmigen Pentagonaster Linck und †Metopaster Slad. (Kreide), den glockenförmig hochgewölbten †Sphaerites Qu. (ohne vortretende Arme), Astropecten Schulze (seit Devon?). Im Tertiär: Goniaster und Astropecten. Cryptozonia kennt man seit dem Silur: †Palasterina M'Coy, †Lindströmaster Greg.; ?†Lepidaster Forb., †Römeraster Stürtz aus dem Devon; †Calliaster Trautsch. Oberkarbon; vereinzelte Formen sind im Jura (†Dermaster Lor., Tropidaster und Solaster Forb.) und in der Kreide (Linckia, Rhopia Gray) gefunden.

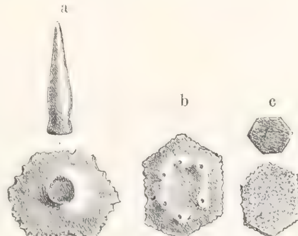


Fig. 67, a, b, c. †Sphaerites Qu. (isolierte Tafeln). Oberjura. a †Sph. scutatus Gf. Tafel mit Stachel. Sontheim, Württemberg. b †Sph. tabulatus Gf. c †Sph. punctatus Gf. Streitberg; Bayern. Aus v. Zittel.

Nach den Feststellungen von Schöndorf ist in den Asteroiden seit der Trias (oder schon seit dem Karbon) keine wesentliche Formänderung zu konstatieren (Astropecten soll sogar seit dem Devon ± unverändert existieren, Stürtz). Für die altpaläozoischen Formen gilt ein Unterschied gegenüber den jüngeren: die fast regelmäßige Gegenständigkeit der Amb. und Adamb. (bei jüngeren: Alternanz dieser Elemente).

2. Klasse †Auluroidea (vgl. oben). Silur, Devon (= †Encrinasteriae, †Lysophiurae, und †Streptophiurae Auct). Figur 68—71.

Die äußerlich teils an See- teils an Schlangensterne sich anschließenden †Auluroideen teilt Schöndorf nach der Lage der Ambulakralia in 2 Unterklassen:

1. Unterklasse †Ophiurasteriae mit gegenständigen Ambulakralia (= †Streptophiurae Auct.).

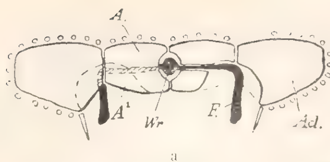
a) Ordnung †Phanerozonia mit Randplatten der Scheibe. †Ophiurina Stürtz, Devon.

b) Ordnung †Cryptozonia ohne Randplatten. (?)†Lapworthura Greg., †Sturtzura Greg., Sturtzaster Eth. (Palaeocoma Salt.), Silur; †Sympterura Bath., †Furcaster Stürtz, †Eoluidia Stürtz, †Miospondylus Greg., †Cheiropteraster Stürtz, Devon.

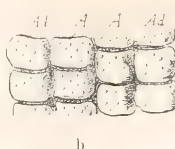
2. Unterklasse. †Encrinasteriae mit wechselständigen Ambulakralia.

a) Ordnung †Phanerozonia mit Randplatten der Scheibe. †Aspidosoma Gf. Unterdevon (Deutschland, Brasilien). †Taeniaster Bill. Silur.

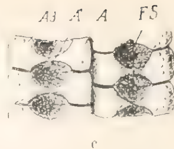
b) Ordnung †Cryptozonia, Randplatten undeutlich oder fehlend (= †Lysophiurae Auct.). †Protaster Forbes, †Eophiura, †Bohemura Jaek., Silur; †Bundenbachia,



a



b



c

Fig. 68.

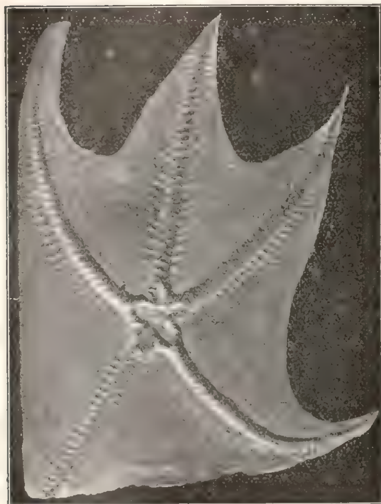
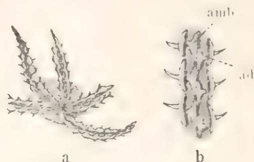


Fig. 69.



a b

Fig. 70.

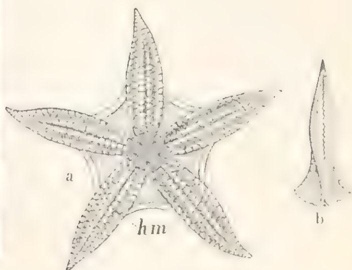


Fig. 71.

Fig. 68 bis 71. †Auluroidea.

Fig. 68 a, b, c. Schema des Armskeletts, a Querschnitt, b von oben, c von unten (A Ambulakralia; Ad Adambulakralia; A_1 Querfortsatz der Ambulakralia auf der Unterseite; F Ambulakralfüßchen; FS Grube für den Austritt von F; Wr Ambulakralrinne. Aus Schöndorf.

Fig. 69. Loriolaster mirabilis Stürtz. Unterdevon; Bundenbach, Rheinpreußen. Oberseite mit gut erkennbarem freigelegtem Mundskelett. Aus v. Stromer.

Fig. 70 a, b. †Palaeophiura simplex Stürtz. Unterdevon; Bundenbach, Rheinpreußen. a Ventralseite; b Armteil, Ventralseite 4mal vergrößert (amb Ambulakralia; ad Adambulakralia). Aus v. Stromer.

Fig. 71 a. †Aspidosoma eifelense Schönd. Unterdevon; Oberdielsen bei Siegen, Westfalen. Rekonstruktion der Ventralseite mit wechselständigen Ambulakralia hm. b †Asp. petaloides Sim. Unterdevon; Hohenreiner Hütte bei Niederlahnstein, Rheinpreußen. Oberseite eines Armes. a nach Schöndorf, b nach Simonowitsch. Aus v. Zittel.

†Palaeophiura. †?Loriolaster Stürtz. Devon.

3. Klasse †Ophiuroidea Schlangensterne. Figur 72.

Echte Ophiuren sind im Paläozoikum besonders große Seltenheiten; es sind hier wohl nur 2 Arten bekannt: †Eucladia Johnsoni Woodw. (Obersilur, England) mit verzweigten Armen und †Onychaster flexilis M. u. W. (Unterkarbon, Nordamerika) mit einfachen Armen, welche beide bislang als †Streptophiuren (erstere wohl auch als Cladophiure) aufgefaßt wurden, aber echte Ophiurenwirbel besitzen.

Zygophiuren wurden dagegen öfters fossil gefunden, und zwar — seit der Trias — in Gattungen, welche noch heute leben, resp. lebenden sehr nahe stehen. †Aspidura, †Acroura Ag. Muschelkalk; Ophioderma Müll. und Ophiolepis Müll. und Trosch. im Rhät; in lithographischen Schiefern des Malm häufiger: †Geocoma d'Orb., Ophiocten Lütk., Ophiocoma Ag., Ophioderma Müll. u. a.; in der Kreide

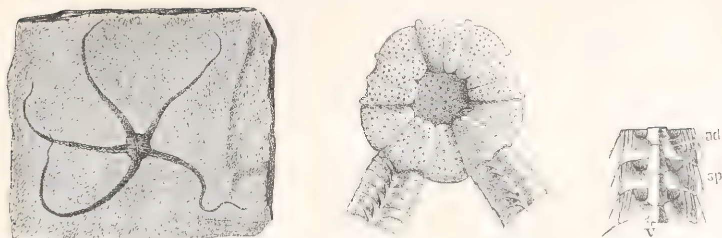


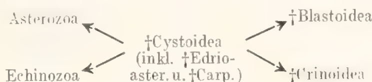
Fig. 72. a, b, c. †Geocoma carinata d'Orb. Oberjura, lithograph. Schiefer: Zandt bei Solnhofen, Bayern. a Exemplar in natürlicher Größe. b Oberseite der Scheibe, in der Mitte eingedrückt, mit proximalen Teilen zweier Arme. c Armteil, Ventralseite. ad Lateral-, v Ventralschilder, sp Stacheln. Aus v. Zittel.

Ophioglypha Lym., im Tertiär Amphiura Forb. u. a. m.

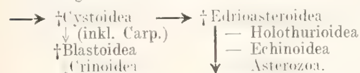
Echte Streptophiurae sind fossil nicht bekannt.

Zusammenfassung. Die Beziehungen der verschiedenen großen Stämme der Echinodermen lassen sich auch mit Hilfe des paläontologischen Materials nicht klar feststellen: stehen doch die †Edrioasteroidea, †Carpoidea und Holothurioidea bereits im Mittelkambrium vollständig getrennt nebeneinander, und im Untersilur ebenso scharf geschieden die †Cystoidea, Crinoidea, †Blastoidea, die Echinoidea und Asterozoa.

An Versuchen, genetische Beziehungen der Stämme untereinander zu konstruieren, hat es nicht gefehlt. M. Neumayr drückte sie aus durch das Schema:



Bather faßte in ähnlicher Weise genetische Beziehungen auf:



Soweit die Organisation der Skelette, der Ambulakralstämme, mit der zeitlichen Verbreitung der Hauptgruppen kombiniert, Schlüsse auf Verwandtschaftsverhältnisse zuläßt, können nur unter den Pelmatozoen einzelne Verbindungslinien wahrscheinlicher gemacht werden. Von den †Cystoidea scheinen Verbindungswege zu den †Blastoidea zu existieren — vgl. †Diploporita und †Parablastoidea — und ferner zu den Crinoideen, wie aus dem Vorkommen von Porensystemen in der Kelchdecke mancher Crinoideen hervorgeht. Wenn apentamere Theken die Urformen der pentameren Echinodermen auszeichneten, dann müssen die Zusammenhänge wenigstens zwischen †Cystoideen und Crinoideen wohl weiter zurückliegen, als überliefertes Material uns erkennen läßt: in ältest kambrischer oder in vorkambrischer Zeit. Ob die †Edrioasteroideen und †Carpoideen primitiveren Urformen nahestehen, oder — wie Jaekel meint — abgewandelte Typen regelmäßig pentamerer, gestielter Pelmatozoen darstellen, das ist nicht sicher zu entscheiden; immerhin muß die Aehnlichkeit der †Edrioasteroideen mit manchen diploporiten †Cystoideen (†Glyptosphäridae) den Gedanken an genetische Beziehungen offen lassen. Ebenso wäre auch wohl an Relationen wenigstens zwischen †cystocidariden Seeigeln und den †Edrioasteroideen zu denken, wennwohl auch hier viele Umgestaltungen vor sich gegangen sein müßten, von denen nichts überliefert ist. Der Ursprung aller übrigen Seeigel bleibt ungeklärt, denn die Versuche, das Scheitelschild der Seeigel mit der Patina der Crinoideen in Uebereinstimmung zu bringen, entbehren doch der sicheren Unterlagen. Trotz öfters geäußerter Widersprüche kann dann wohl weiter auch an genetische Beziehungen der †Edrioasteroideen zu den Asterozoen, speziell den Asteroideen, gedacht werden: das Ambulakralskelett der letzteren läßt sich durchaus den subambulakralen Tafeln der Theka von †Edrioasteroideen gleichsetzen. Wie sich dann weiter die Asteroideen zu den Ophiuroideen und †Auluroideen verhalten, darüber gibt das fossile Material vorläufig keinen sicheren Aufschluß.

Wie auch immer man sich die genetischen Beziehungen der Echinodermenstämme konstruieren mag — der Spekulation bleibt da ein weites Feld — eins zeigt das Fossilmaterial sehr klar: Wie in allen anderen Stämmen der Evertebraten so auch hier seit uralter Zeit scharfe Scheidung der Unterstämme, nur wenige Andeutungen von Uebergängen zwischen ihnen.

Literatur. *Zusammenstellungen in* **K. A. v. Zittel,** *Grundzüge der Paläontologie. I.* [illegible]

brata, 3. Aufl., 1910. — ***E. Ray Lankester.*** *Treatise on Zoology. Part III The Echinodermata. By* ***Bather, Gregory and Goodrich.*** — ***F. A. Bather,*** *Caradocian Cystidea from Girvan. Transact. R. Soc. Edinburgh, Vol.* 49, *1913.* — ***Fr. Klinghardt,*** *Ueber die innere Organisation und Stammesgeschichte einiger irregulärer Seeigel der oberen Kreide. Freiburg-Jena 1911.* — ***R. Rüdemann,*** *The low. Sil. shales of the Mohawk valley. N. Y. State Mus. Bull.,* 162, *1912.* — ***Fr. Schöndorf,*** *Ueber einige „Ophiuriden und Asteriden" . . . . . und System. palaeoz. Seesterne. Jahrb. Nass. Ver. f. Naturkde. Wiesbaden, Bd.* 63, *1910.* — ***A. Tornquist,*** *Biologische Deutung der Umgestaltung der Echiniden . . . . Zeitschr. f. indukt. Abst. u. Vererbungslehre, Bd.* 6, *1911.* — ***Ch. D. Walcott,*** *M. Cambrian Holothurians and Medusae. Smiths. Misc. Coll., Vol.* 57, *1911.* — ***J. Wanner,*** *Timorocrinus n. g. a. d. Perm v. Timor. Centralbl. f. Min. usw., 1912.*

J. F. Pompeckj.

Stahl

Georg Ernst.

Geboren am 21. Oktober 1660 zu Ansbach, ist als Professor der Medizin und Chemie in Berlin am 14. Mai 1734 gestorben, nachdem er von 1694 bis 1716 in gleicher Eigenschaft an der Universität Halle tätig gewesen war. Als akademischer Lehrer hat er höchst anregend auf seine Schüler gewirkt, von denen viele zu Ansehen gelangten. Im Bereiche der Chemie hat er besonders durch Ausbildung einer Verbrennungslehre, durch seine Phlogistontheorie, größten Einfluß auf seine Zeitgenossen ausgeübt. Wenn auch die ihr zugrunde liegende Annahme, daß bei der Verbrennung und ähnlichen Prozessen, z. B. der Metallverkalkung, ein hypothetischer Stoff, das Phlogiston, entweiche, grundfalsch war, so konnte doch die Chemie unter dem Einfluß dieser Hypothese und ihres Vertreters große Fortschritte machen, da eine größere Anzahl chemischer Vorgänge, unter gemeinsamen Gesichtspunkten zusammengefaßt und gedeutet wurde. Die Stahlsche Lehre brach erst zusammen, als Lavoisier, gestützt auf die Arbeiten ihrer eifrigsten Anhänger Cavendish, Scheele, Priestley und auf eigene quantitative Untersuchungen, die Verkehrtheit der zugrunde liegenden Hypothese beweisen konnte.

Stahl fand als Arzt große Anerkennung; das Schwergewicht seiner wissenschaftlichen Tätigkeit lag jedoch in der Chemie, so daß von seinen Werken nur die chemischen große Beachtung gefunden haben: von solchen seien die folgenden genannt: Zymotechnia fundamentalis (1697), Specimen Becherianum (1702), Experimenta etc. (1731), besonders die Schrift Von dem sogenannten Sulphure usw. (1718).

E. von Meyer.

Stalaktiten und Stalagmiten.

Zapfenförmige zumeist aus kohlensaurem Kalk (Kalkspat) bestehende in Höhlen (Kellern) vorkommende Mineralgebilde. Sie kommen durch herabtropfendes Wasser zustande, welches große Mengen der betreffenden Stoffe gelöst enthält. Dadurch bildet sich ein solcher Zapfen an der Höhlendecke und ein korrespondierender am Boden. Die ersteren sind zufolge der ersten Anlage als Hülle eines Tropfens hohl und heißen Stalaktiten, die letzteren haben keinen Hohlraum im Innern und werden Stalagmiten genannt.

Stas

Jean Servais.

Geboren am 20. September 1813 in Löwen, gestorben am 13. Dezember 1891 zu Brüssel als Präsident der Kommission für Maße und Gewichte sowie Kommissar bei der Münze, war zuvor Professor der Chemie an der Militärschule zu Brüssel. Abgesehen von einigen Untersuchungen über organische Verbindungen, die er vom Standpunkt der Typentheorie beschrieb, sowie von wertvollen Arbeiten aus dem Bereiche der gerichtlichen Chemie, besonders über Ermittelung vnn Giften, ist er berühmt geworden durch seine meisterhaften Atomgewichtsbestimmungen. Für eine Reihe von Elementen, namentlich Silber, Halogene, Kohlenstoff, ermittelte er mit einer Genauigkeit, die zuvor von keinem Chemiker erreicht worden war, die Atomgewichte. Diese als klassisch zu bezeichnenden Arbeiten sind für alle späteren gleichgerichteten Untersuchungen vorbildlich geworden; sie sind unter dem Titel: Nouvelles recherches sur les proportions chimiques (1865). Deutsch von Aronsteim (1867) erschienen. Die einzelnen Berichte über diese Forschungen sind meist in den Annales de Chimie et de Physique veröffentlicht worden.

E. von Meyer.

Statistik.

1. Das Gebiet für statistische Betrachtungen in der Physik. 2. Statistische Deutung der Thermodynamik. 3. Die Möglichkeit unumkehrbarer Vorgänge. 4. Die Zurückführung der Entropie auf Wahrscheinlichkeit. 5. Die Entropie kohärenter Strahlen. 6. Der Entwickelungsgang der Statistik. 7. Berechnung der Entropie für ein ideales Gas; H-Theorem. 8. Einwände gegen das H-Theorem. 9. Die Hypothese der molekularen Unordnung. 10. Boltzmanns Stellung zu den Einwänden. 11. Bedeutung des H-Theorems für die Thermodynamik. 12. Vergleich des statistischen und des thermodynamischen Entropiewertes; spezifische Wärme der Gase. 13. Der Gleichverteilungssatz. 14. Widersprüche gegen den Gleichverteilungssatz. 15. Das Versagen des Gleichverteilungssatzes beim Strahlungsgesetz. 16. Die Quantentheorie.

1. Das Gebiet für statistische Betrachtungen in der Physik. Statistische Betrachtungen treten in der Physik überall dort auf, wo wir einem Komplex sehr vieler gleichartiger Vorgänge gegenüber stehen, die wir in ihren Einzelheiten nicht kennen, wohl auch gar nicht kennen wollen. Ein sehr bezeichnendes Beispiel dafür bietet der radioaktive Zerfall der Atome. Wir sind fest überzeugt, daß zum Zerfall eines Atoms ganz bestimmte Bedingungen in seinem Innern erfüllt sein müssen. Da wir sie aber nicht kennen, und außerdem uns bisher nicht für das einzelne Atom, sondern nur für die Zahl der in einer gegebenen Zeit zerfallenden Atome interessieren, so behandeln wir den Zerfall eines Atoms als rein zufälliges Ereignis. Ganz ähnlich verfahren die Astronomen bei ihren Forschungen über den Aufbau des Fixsternsystems. Von den sehr entfernten Fixsternen, etwa denen in der Milchstraße, interessieren uns nicht mehr der einzelne, sondern allein die Dichte ihrer räumlichen Verteilung; damit aber treten statistische Betrachtungen in Kraft. Das klassische Beispiel aber bietet die kinetische Gastheorie. Zwar setzt man in ihr alle Einzelheiten über die mechanischen Eigenschaften der Molekeln als bekannt voraus (wenn auch durch Hypothesen, welche vielfach nur vorläufigen Wert haben); aber die Unmöglichkeit, bei der Unzahl der Molekeln die Bahn des einzelnen zu verfolgen, zwingt dabei von vornherein zur Beschränkung auf statistische Mittelwerte, als da sind die mittlere Geschwindigkeit der Molekeln, die Zahlen, welche deren Verteilung über den Raum und über die verschiedenen Geschwindigkeiten angeben, die mittlere freie Weglänge usw.

2. Statistische Deutung der Thermodynamik. Ist so das Gebiet für die Statistik in der Physik ein sehr ausgedehntes, so bezeichnet man doch meist mit diesem Namen ein etwas beschränkteres; nämlich jenen Teil der Physik, welcher sich mit der Deutung der Thermodynamik, insbesondere des zweiten Hauptsatzes, abgibt. Robert Clausius, der Begründer der Thermodynamik, hat diesen dahin ausgesprochen, daß es eine bestimmte, für jeden Körper aus Temperatur, Druck, chemischer Zusammensetzung usw. angebbare Zustandsfunktion, die Entropie S gibt, welche die Eigentümlichkeit hat, bei keinem physikalischen Vorgange abzunehmen; stets wächst sie; nur in idealen, selten genau zu verwirklichenden Fällen bleibt sie unverändert. Dennoch sind Vorgänge der letzteren Art besonders wichtig, weil der Endzustand, zu welchem sie führen, sich wieder in den Anfangszustand verwandeln läßt; sie sind umkehrbar. Alle mit Entropiezunahme verknüpften Vorgänge sind hingegen unumkehrbar; denn bei ihrer Umkehrung müßte die Entropie abnehmen. Die Natur zieht somit gewisse Zustände gewissen anderen vor.

Die Strahlungstheorie überträgt den Entropiebegriff auch auf die von aller Materie losgelöste Strahlung im leeren Raum. Ein leuchtender Körper nimmt nämlich an Entropie ab, folglich muß die entsandte Strahlung mindestens soviel Entropie besitzen, daß diese Abnahme ausgeglichen wird.

3. Die Möglichkeit unumkehrbarer Vorgänge. Nun ist aber die Strahlung ein elektro-magnetischer Vorgang; alle thermisch-chemischen Veränderungen an Körpern führen wir auf Bewegungen von Atomen und Atomkomplexen zurück. Weder in den Maxwellschen Grundgleichungen der Elektrodynamik noch in der Grundgleichung der Mechanik sind Züge enthalten, welche auf eine Vorliebe der Natur von der geschilderten Art schließen lassen. Im Gegenteil läßt sich in beiden Gebieten leicht beweisen, daß jeder überhaupt mögliche Vorgang auch in der umgekehrten Richtung verlaufen kann. So stehen wir vor der schweren Frage: Wie verträgt sich der zweite Hauptsatz mit den anerkannten Gesetzen der Elektrodynamik und Mechanik?

4. Die Zurückführung der Entropie auf Wahrscheinlichkeit. Die Antwort darauf ist das Lebenswerk Ludwig Boltzmanns: Der zweite Hauptsatz ist kein Naturgesetz, sondern nur ein Wahrscheinlichkeitssatz. Die Entropie ist eng verknüpft mit der Wahrscheinlichkeit. Jene Vorliebe der Natur beruht einfach darauf, daß die Wahrscheinlichkeit der physikalischen Zustände im allgemeinen zunimmt.

Wie dieser Zusammenhang sein muß, ergibt die folgende Betrachtung. Besteht ein System aus zwei räumlich getrennten Körpern 1 und 2 (welche sich aber beliebig eng berühren dürfen), so ist die gesamte Entropie nach der Thermodynamik

$$S = S_1 + S_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

während andererseits seine Wahrscheinlichkeit nach einem bekannten Satze der Wahrscheinlichkeitsrechnung

$$W = W_1 . W_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

ist. Nach der Definition der Funktion Logarithmus folgt daraus

$$S = k \log W \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

wobei k eine zunächst noch nicht zu bestimmende Konstante bedeutet.

5. Die Entropie kohärenter Strahlen. Eine eigenartige Bestätigung findet dieser Gedanke in der einzigen bekannten Ausnahme von der Gleichung 1). Der Satz 2) setzt nämlich voraus, daß die beiden Körper voneinander unabhängig sind. Ließe

sich infolge einer Verknüpfung zwischen ihnen von der Molekularbewegung des einen irgendein Schluß auf die Bewegung im anderen ziehen, verhielten sich etwa beide Körper wie Spiegelbilder zueinander, so wäre Satz 2) unzutreffend. Nun ist freilich in der Welt der Körper kein solcher Fall bekannt. Dagegen kann man in der Optik bekanntlich leicht, z. B. durch Spiegelung und Brechung an einer Glasplatte, aus einem Strahl zwei herstellen, welche zueinander kohärent sind. Dies aber bedeutet, daß sie bis auf die Intensität in allen Einzelheiten vollkommen übereinstimmen. Hier wird man also Abweichungen von dem Satze 2), und da Gleichung 3) allgemein gültig sein soll, auch Abweichungen vom Additionstheorem der Entropie (Gleichung 1) erwarten müssen.

Solche treten nun in der Tat auf. Denn berechnet man die Gesamtentropie der beiden kohärenten Strahlen nach dem Additionstheorem, so findet man sie größer als die Entropie des ungeteilten Strahls; man muß somit die Spiegelung und Brechung für unumkehrbar erklären. Tatsächlich gibt es aber viele Interferenzerscheinungen, welche sie dadurch vollständig rückgängig machen, daß sich dabei zwei kohärente Strahlen restlos vereinigen. Dieser Widerspruch zeigt, daß die Entropien kohärenter Strahlen sich nicht additiv zur Gesamtentropie zusammensetzen. Vielmehr treten hier ganz andere Formeln in Kraft.

6. Der Entwickelungsgang der Statistik. Das Ziel der physikalischen Statistik muß sein, allgemeine für die Materie und Strahlung gleichmäßig geltende Gesichtspunkte zu finden, um nach ihnen die Wahrscheinlichkeit W zu berechnen. Von diesem Ziel sind wir noch weit entfernt. Freilich liegen sehr allgemeine Ansätze für die statistische Mechanik der Materie vor (Boltzmann, Gibbs). Eigentlich findet man alle wesentlichen Züge an ihnen, wenn man sich auf ideale Gase beschränkt, wie wir es in Nr. 7 tun wollen. Aber diese Züge sind in manchen Punkten nachweislich nicht in Uebereinstimmung mit der Erfahrung. Beim Versuch, diese statistischen Grundsätze auf die Strahlung zu übertragen, hat man nun gar völlig Schiffbruch erlitten; und dies Mißgeschick ist Ausgangspunkt geworden für mancherlei noch nicht durchgebildete und auch untereinander nicht durchweg in Zusammenhang stehende Ansätze, welche man alle unter dem Namen „Quantentheorie" zusammenfaßt. Auch auf diese gehen wir später ein. Trotz der großen, noch gar nicht abzusehenden Schwierigkeiten, welche hier vorliegen, herrscht allgemein die Ueberzeugung, daß der Grundgedanke der Statistik richtig ist, und daß sie uns noch zu vielen großen Erfolgen führen wird.

7. Berechnung der Entropie für ein ideales Gas; H-Theorem. Wir behandeln, wie angekündigt, zunächst den Fall eines idealen Gases, bei welchem N als materielle Punkte gedachte Molekeln von der Masse m, deren gesamte kinetische Energie E ist, in einem Volumen V vorhanden sind. Die Molekeln üben keine Kräfte aufeinander aus, außer bei einem Zusammenstoß; doch sind wegen der geringen Ausdehnung der Molekeln Zusammenstöße so selten, daß man bei den späteren, für bestimmte Augenblicke geltenden Abzählungen die Zahl der gerade zusammenstoßenden Molekeln vernachlässigen kann.

Bei Berechnung einer Wahrscheinlichkeit steht man bekanntlich stets zunächst vor der Schwierigkeit, die gleichwahrscheinlichen Fälle ausfindig zu machen. Diese Schwierigkeit tritt auch hier auf und sie ist nur durch eine Hypothese zu überwinden.

Die Koordinaten x, y, z eines bestimmten Moleküls sollen in den Intervallen von x bis $x + dx$, von y bis $y + dy$, von z bis $z + dz$, die Komponenten seiner Geschwindigkeit q in den Intervallen von q_x bis $q_x + dq_x$, von q_y bis $q_y + dq_y$, von q_z bis $q_z + dq_z$ liegen. Der übliche Ansatz für die Wahrscheinlichkeit lautet dann: die Wahrscheinlichkeit für den geschilderten Zustand ist bis auf einen von x, y, z, q_x, q_y, q_z unabhängigen Faktor proportional zu

$$m^3 \, dx \, dy \, dz \, dq_x \, dq_y \, dq_z = m^3 \sigma; \quad \ldots \ldots 4)$$

Gleich wahrscheinlich sind also die Fälle, in denen σ den gleichen Wert hat. Damit ist aber auch alles weitere eindeutig bestimmt.

Der bequemeren Ausdrucksweise wegen ist es bei diesen Betrachtungen üblich, von einer sechsdimensionalen Mannigfaltigkeit zu sprechen, in welcher x, y, z mq_x, mq_y, mq_z die Cartesischen Koordinaten sind. Jedem Moleküle des Gases entspricht ein Punkt in diesem Phasenraum; aus seiner Lage sind sowohl die Koordinaten als die Geschwindigkeit des Moleküles zu entnehmen. Denken wir uns den ganzen Phasenraum in lauter gleiche Gebiete σ eingeteilt, so enthält die Aussage, daß ein Molekül einem bestimmten Gebiet σ angehört, ebenfalls eine Aussage über seine Lage und Geschwindigkeit, wenngleich da noch die durch dx usw. gegebenen Spielräume bleiben.

Nun sei die Zahl P der Elementarbereiche σ, welche für das Molekül in Betracht kommen, sehr groß. Andererseits soll die Zahl N der Gasmoleküle wiederum so groß gegen P sein, daß die Zahl

$$f(x, y, z, q_x, q_y, q_z) \, \sigma$$

derjenigen Moleküle, welche in dem durch x, y usw. bestimmten Bereich σ liegen, auch

noch groß ist. Die Funktion f bestimmt dann den Zustand des Gases, insofern man aus ihr entnehmen kann, wie viel Moleküle jedem Bereich σ angehören, d. h. wie sie sich über das Volumen V und über die vorkommenden Geschwindigkeiten verteilen. Sie ist zunächst ganz willkürlich, nur gebunden an die Bedingungen, daß außerhalb des Volumens V kein Molekül vorhanden ist, daß für alle Molekülen nur eine bestimmte Gesamtenergie E zur Verfügung steht, und daß schließlich die Gesamtzahl aller Molekeln

$$\Sigma f \sigma = N \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 5)$$

ist.

Wollen wir die Wahrscheinlichkeit W des zur Funktion f gehörenden Zustandes berechnen, so ist dabei wesentlich, daß sich der Zustand wegen der Gleichwertigkeit aller Molekeln nicht ändert, wenn wir zwei davon miteinander vertauschen. Nach bekannten Wahrscheinlichkeitssätzen finden wir so:

$$W = \frac{N!}{\pi . (f\sigma)!} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 6)$$

und daraus für die Entropie nach 3)

$$S = const - k \Sigma f \log f . \sigma \ldots\ldots\ldots 7)$$

Bei der Umrechnung ist einmal Gleichung 5) benutzt, sodann die für große Werte von N gültige Stierlingsche Annäherungsformel für N! Die Summation ist hier wie in 5) über alle vorkommenden Bereiche σ auszuführen. — Diese Formel tritt zuerst in den gastheoretischen Untersuchungen Boltzmanns auf, nur daß er statt der Entropie S die Größe

$$H = -\frac{1}{k} S = \Sigma f \log f . \sigma - const \ldots\ldots\ldots 8)$$

benutzt.

Fragen wir zunächst, welche unter allen möglichen Funktionen f die Entropie zu einem Maximum macht. Die Variationsrechnung ergibt: die gesuchte Funktion lautet:

$$f = \alpha e^{-\beta(q^2_x + q^2_y + q^2_z)} \ldots\ldots\ldots\ldots 9)$$

wobei

$$\alpha = \frac{N}{V} \left(\frac{2mN}{\pi 4E}\right)^{\frac{3}{2}}, \beta = \frac{3mN}{4E} \ldots\ldots 10)$$

zwei nur durch die Zahl der Atome, die Energie und das Volumen bedingte Konstanten sind. Die Unabhängigkeit der Funktion f von den Koordinaten x, y, z sagt aus, daß im Zustand der maximalen Wahrscheinlichkeit die Molekeln gleichmäßig über das ganze Volumen V verteilt sind, während ihre Abhängigkeit von der Geschwindigkeit q dem Maxwellschen Geschwindigkeitsverteilungsgesetz entspricht.

Der entscheidende Punkt liegt nun in dem Boltzmannschen H-Theorem. Boltzmann zeigt, daß die Größe H sich nur durch die Zusammenstöße zwischen den Molekülen verändert, und zwar stets so, daß H abnimmt, die Entropie S also wächst, bis der in Gleichung 9) geschilderte Zustand maximaler Entropie erreicht ist. Dieser Zustand ist der einzige, welcher, soweit keine äußeren Eingriffe erfolgen, dauernd erhalten bleibt. Alle anderen Zustände gehen mit der Zeit in ihn über und jeder derartige Uebergang ist unumkehrbar. Hier wird also die Unumkehrbarkeit eines bestimmten mechanischen Vorganges bewiesen, und damit der zweite Hauptsatz in Einklang mit der Mechanik gebracht. Darauf beruht der große wohlbegründete Ruhm des H-Theorems.

8. Einwände gegen das H-Theorem. Freilich war das H-Theorem heftigen Angriffen ausgesetzt. Der früheste Angriff lag in dem Loschmidtschen Umkehreinwand: Wie oben erwähnt, kann jeder mechanische Vorgang auch in der umgekehrten Richtung verlaufen; beide Fälle unterscheiden sich nur durch die Richtung aller Geschwindigkeiten. Zu jedem Vorgang im Gase, bei welchem H abnimmt, kann man also einen möglichen Vorgang angeben, welcher in der umgekehrten Richtung verläuft, also H größer macht. Er unterscheidet sich von dem ersteren nur in der Richtung aller Geschwindigkeiten. Noch überraschender wirkt der Wiederkehreinwand. Im Anschluß an Untersuchungen von Poincaré konnte Zermelo zeigen, daß alle Zustände, welche in dem Gase einmal vorhanden waren, periodisch wiederkehren; und wenn auch diese Perioden wegen der Unzahl der Moleküle ungeheuer groß sind, so widerspricht dies doch der Behauptung, daß das Minimum von H den Endzustand darstellt, der sich von selbst nicht ändert.

Stellt man die Größe H als Funktion der Zeit durch eine Kurve dar, so soll es nach dem Wortlaut des H-Theorems keine mit wachsender Zeit ansteigende Stücke in ihr geben. Der Umkehreinwand aber besagt, daß man die Richtung der Zeitachse umkehren kann, wobei aus jedem abfallenden Stück ein ansteigendes wird; und der Wiederkehreinwand behauptet, daß die Kurve eine periodische ist, daß mithin jedem Abfall ein Ansteigen entspricht. Jeder Wert, welchen H überhaupt annimmt, wird danach von der H-Kurve ebensooft im Anstieg als im Abstieg erreicht. Wie erklären sich diese Widersprüche?

9. Die Hypothese der molekularen Anordnung. In dem Boltzmannschen Beweise für das H-Theorem findet man bei näherem Zusehen eine plausible, aber doch nicht selbstverständliche Wahrscheinlichkeitsannahme. Die Produkte dx dy dz in 4)

stellen Unterabteilungen des Volumens V dar und man kann aus 4) durch Integration über die Geschwindigkeitskomponenten q_x, q_y, q_z entnehmen, wie viel Moleküle in jeder dieser Abteilungen liegen. So klein diese Räume nun auch sein sollen, so sollen sie doch noch sehr viele Moleküle enthalten. Ueber die Verteilung der Molekeln in einem derartigen Bereiche selbst sagt die Zustandsfunktion f nichts aus. Hier wird nun die Zahl der Zusammenstöße zwischen zwei Molekeln so berechnet, als ob diese letztere Verteilung durchaus nur Wahrscheinlichkeitsgesetzen unterworfen wäre, als ob auch in molekularen Dimensionen keine Gesetzmäßigkeit in der Verteilung vorhanden wäre. Gegen diesen „Stoßzahlansatz“ richten sich in letzter Linie alle Einwände gegen das H-Theorem.

Zu seiner Verteidigung macht Planck die Annahme, daß alle in der Natur verwirklichten Fälle von Molekularbewegung tatsächlich „molekular ungeordnet“ sind, so daß der Stoßzahlansatz bei ihnen stets zutrifft. Der Umkehreinwand wird dann durch die Entgegnung ausgeschaltet, daß der umgekehrte Vorgang nicht mehr molekular ungeordnet ist, also nicht vorkommt. Der Wiederkehreinwand aber ist an einige Voraussetzungen gebunden, welche, wie z. B. die Annahme glatter, unbeweglicher Wände im Sinne einer Molekulartheorie sicherlich nicht zutreffen. Auf diese Weise erhält das H-Theorem und damit der ganze zweite Hauptsatz volle ausnahmslose Allgemeingültigkeit.

10. Boltzmanns Stellung zu den Einwänden. Wie Boltzmann sich selbst zu den beiden Einwänden gestellt hat, ist aus allen seinen Schriften darüber wohl wegen eines etwas schwankenden Sprachgebrauches nicht mit der Deutlichkeit zu ersehen, wie aus der glänzenden Interpretation, welche sein Schüler Paul Ehrenfest dazu gegeben hat. Hier werden beide Einwände als an sich durchaus richtig anerkannt, nur wird ihr Gegensatz gegen das H-Theorem geleugnet. Denn der Stoßzahlansatz und damit das ganze H-Theorem ist ein Wahrscheinlichkeitssatz; er sagt aus, was wahrscheinlich geschieht, kann aber seiner ganzen Natur nach nicht leugnen, daß die unwahrscheinlichen Ausnahmefälle doch einmal eintreten. Im Gegenteil wird doch bei jeder Berechnung einer Wahrscheinlichkeit deren Möglichkeit ausdrücklich zugegeben und benutzt. Die H-Kurve steigt in der Tat, wie es der Wiederkehreinwand darstellt, gelegentlich, wenn auch sehr selten, zu höheren Werten an. Aber, wird man fragen, wenn sie so jeden Wert von H, den sie überhaupt erreicht, ebensooft im Aufstieg als im Abstieg erreicht, wie steht es dann mit der Behauptung, daß ein Aufstieg wahrscheinlicher ist als ein Abstieg?

Die Antwort darauf lautet: Das liegt an der Unstetigkeit der Größe H. Schon die Verteilungsfunktion f ist unstetig, denn die Zahl f σ ändert sich um den Betrag 1, wenn ein Molekül aus dem betreffenden Elementarbereich σ austritt. Ebenso kann sich H nach 8) nur um endliche Beträge ändern; dafür kann eine solche Aenderung auch nicht in jedem Augenblick, sondern nur im Augenblick eines Zusammenstoßes zwischen zwei Molekeln eintreten. Die H-Kurve ist keine stetige Kurve, sondern besteht aus diskreten Punkten, von denen jeder den Wert von H unmittelbar nach einem Zusammenstoße darstellt.

Daß hierdurch alle Schwierigkeiten gehoben werden, veranschaulicht ein einfaches Beispiel. Eine große Anzahl von numerierten Kugeln sei auf zwei Gefäße verteilt. Aus einer Urne, welche geradesoviel numerierte Zettel enthält, werde je ein Zettel gezogen und sogleich wieder in die Urne hineingetan. Die Kugel, welche die gleiche Nummer trägt, wird gleichzeitig aus dem Gefäß, in dem sie sich befindet, in das andere überführt.

Man übersieht auch ohne Rechnung, daß die bei weitem wahrscheinlichste Verteilung der Kugeln die gleichmäßige Verteilung über beide Gefäße ist. Weicht der Zustand erheblich davon ab, so wird wahrscheinlich bei der nächsten Ziehung die Nummer einer Kugel gezogen werden, welche in dem volleren Gefäße liegt, so daß sich die Differenz der Füllungen allmählich ausgleicht. Versteht man unter D diese Differenz ihrem absoluten Werte nach, so kann man das Analogon zum H-Theorem aufstellen: Weicht D von seinem Minimalwerte 0 erheblich ab, so nähert es sich aller Wahrscheinlichkeit nach rasch diesem Werte. Auf einer analog zur H-Kurve konstruierten D-Kurve spricht die Wahrscheinlichkeit für absteigende Teile. Andererseits kann es, so unwahrscheinlich es auch ist, vorkommen, daß die D-Kurve von ihrem Minimum aus zu sehr hohen Werten ansteigt. Auch hierbei wird jeder Wert von D ebensooft im Anstieg als im Abstieg erreicht. Außerdem aber läßt sich der Umkehreinwand wörtlich auf dies Beispiel übertragen, da doch jede Reihe von Ziehungen auch in zeitlicher Umkehrung eintreten kann. Die scheinbaren Widersprüche, die auch hier wieder auftreten, erklären sich aus der Unstetigkeit der D-Kurve, welche gleich der H-Kurve eine Gesamtheit diskreter Punkte ist, deren jeder den Wert von D nach einer Ziehung angibt. Die Differenz in der Höhe zweier benachbarten Punkte hat stets den Betrag 2. Die überwältigende Mehrzahl dieser Punkte wird freilich in der Nähe von 0 liegen. Ist

die D-Kurve aber bei der letzten Ziehung von N — 2 auf N gestiegen, wobei N eine einigermaßen hohe Zahl ist, so wird in der großen Mehrzahl dieser Fälle bei der nächsten Ziehung der Abstieg von N auf N — 2 folgen, und nur selten ein weiterer Aufstieg auf N + 2. Zwar bleibt es richtig, daß ein Ueberschreiten von N im Aufstieg ebenso oft erfolgt als im Abstieg, d. h. die Folgen: N — 2, N, N + 2 und: N + 2, N, N — 2 sind gleich häufig. Weit häufiger aber ist ein „Spitzenmaximum" N — 2, N, N — 2, am allerseltesten aber ein Spitzenminimum N + 2, N, N + 2. Hierin zeigt sich besonders deutlich der Sinn des Satzes, daß D wahrscheinlich sinkt. Ganz analog ist das H-Theorem aufzufassen und man macht sich an der Analogie leicht klar, daß ihm tatsächlich weder der Umkehr- noch der Wiederkehreinwand widerspricht. Der zweite Hauptsatz ist somit lediglich ein Wahrscheinlichkeitssatz. Es ist nicht unmöglich, sondern nur außerordentlich selten, daß Umkehrungen irreversibler Prozesse auftreten.

11. Bedeutung des H-Theorems für die Thermodynamik. Alle diese Betrachtungen über das H-Theorem und seine Bedeutung sind freilich nur für den besonderen Fall des Ueberganges in den Gleichgewichtszustand durchgeführt. Daß sie sich auf den Entropiesatz im allgemeinen übertragen lassen, ist eine statistisch noch nicht bewiesene Forderung. Das Vertrauen auf die Möglichkeit einer Verallgemeinerung findet aber eine wesentliche Stütze in dem thermodynamischen Beweisgang für den Entropiesatz. Dabei wird (vgl. z. B. die Plancksche Thermodynamik) die Existenz eines einzigen unumkehrbaren Vorganges vorausgesetzt (z. B. die Unumkehrbarkeit eines Dichteausgleiches beim Gas); alles weitere läßt sich dabei ableiten.

Wird nun durch diese Boltzmannsche Auffassung der Wert der Thermodynamik, deren wesentlichste Grundlage doch der 2. Hauptsatz bildet, herabgesetzt? Ihr praktischer Wert nun sicherlich nicht, bei der Seltenheit der Ausnahmefälle erübrigt sich vollständig, darauf in praxi Rücksicht zu nehmen. Aber auch an ihrer prinzipiellen Bedeutung für die physikalische Erkenntnis wird nichts eingebüßt. Die Wahl der Elementarbereiche gleicher Wahrscheinlichkeit z. B. erfordert eine Fülle neuer naturgesetzlicher Erkenntnis. Freilich ist von diesen Schätzen vorläufig noch wenig gehoben, und wir müssen uns hier auf eine kurze Andeutung einschränken. Die Größe jener Elementarbereiche σ ist zwar aus den Gleichungen 7 und 8 herausgefallen, weil die Summe $\Sigma f \log f.\sigma$ tatsächlich nicht mehr von ihr abhängt, sondern gleich dem entsprechenden Integral $\int \log f d\sigma$; aber die additive Konstante hängt wesentlich von ihr ab. Nun hat neuerdings das Nernstsche Wärmetheorem den Wert dieser Konstanten kennen gelehrt; denn es sagt aus, daß beim absoluten Nullpunkte der Temperatur die Entropie eines festen oder flüssigen Körpers Null ist. Es muß sich also auf ihm eine Aussage über die Größe von σ ableiten lassen.

Von der Zurückführung der Entropie auf Wahrscheinlichkeit wird schließlich auch die Thermodynamik ihren unmittelbaren Nutzen haben. Man empfindet es oftmals störend, daß sie zur Berechnung von Entropiewerten von Vorgängen spricht, deren Realisierbarkeit sehr zweifelhaft erscheinen kann. Alle diese Bedenken aber werden schwinden, wenn es gelingt, diese Entropiewerte statistisch nach Gleichung 3 zu berechnen.

12. Vergleich des statistischen und des thermodynamischen Entropiewertes. Spezifische Wärme der Gase. Wir gehen jetzt noch einmal zurück auf die Betrachtungen von Nr. 7, und berechnen nach Gleichung 7) und 9) den Maximalwert der Entropie. Wir finden

$$S = \text{const} + kN\,(3/2 \log E + \log V). \quad 11)$$

Dieser wahrscheinlichste Zustand muß aber der sein, welchen wir bei Gasen gewöhnlich beobachten und auf welchen sich die Gleichungen der Thermodynamik beziehen. Aus der thermodynamischen Definition der Entropie

$$dS = \frac{dE + pdV}{T}$$

folgen aber für ihre beiden partiellen Differentialquotienten nach E und V die Werte

$$\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_E = \frac{p}{T}, \quad \left(\frac{\partial S}{\partial E}\right)_V = \frac{1}{T} \quad \ldots 12)$$

Führt man diese Differentiationen an 11) aus, so findet man:

$$pV = kNT, \quad T = \frac{2E}{3kN} \quad \ldots\ldots 13)$$

Die erste dieser Gleichungen ist offenbar die Zustandsgleichung des Gases. Sie stimmt mit dem Boyle-Mariotteschen Gesetz

$$pV = RnT$$

überein, wobei $R = 8{,}315.10^7$ erg/grad die universelle Gaskonstante und n die Zahl der Mole[1]) ist, wenn man

[1]) Unter einem Mol oder Grammolekül versteht man die Anzahl von Grammen eines Stoffes, welche gleich seinem Molekulargewicht ist. Da das letztere das relative Gewicht eines Moleküles angibt, so enthält das Mol bei jedem Stoff die gleiche Zahl von Molekülen.

$$k\frac{N}{n} = R \;\ldots\ldots\ldots\ldots 14)$$

setzt. $\frac{N}{n}$ ist die Zahl der Moleküle pro Mol. Wir wollen nun vorweg nehmen, daß man die Zahl k aus dem Planckschen Strahlungsgesetz ermitteln kann:

$$k = 1{,}346 \cdot 10^{-16} \text{ erg/grad} \;\ldots\ldots 15)$$

Somit findet man nach 14, daß auf 1 Mol $6{,}175 \cdot 10^{23}$ Moleküle kommen. Um die Wichtigkeit dieser Zahl hervortreten zu lassen, sei noch bemerkt, daß man aus ihr und der Ladung eines elektrochemischen Grammäquivalentes das Elementarquantum der Elektrizität e berechnen kann. Man findet so $e = 4{,}69 \cdot 10^{-10}$ elektrostatische Einheiten, was bis auf wenige Prozent mit den besten sonstigen Messungen übereinstimmt.

Nach der zweiten der Gleichungen 13) und nach Gleichung 10) können wir die Konstante β des Maxwellschen Verteilungsgesetzes (Gleichung 9) auf die Temperatur zurückführen; wir finden

$$\beta = \frac{m}{2kT} \;\ldots\ldots\ldots\ldots 16)$$

Aus derselben Beziehung finden wir auch die spezifische Wärme pro Mol; nämlich

$$c_v = \frac{1}{n}\frac{dE}{dT} = \frac{3}{2}k\frac{N}{n} = \frac{3}{2}R \;\ldots 17)$$

Nimmt man die thermodynamische Beziehung $c_p - c_v = R$ hinzu, so folgt daraus

$$\frac{c_p}{c_v} = \frac{5}{3} = 1{,}67 \;\ldots\ldots\ldots 18)$$

In 17) ist die Energie nach Erg gemessen. Benutzt man die Kalorie als Einheit, so ist durch das mechanische Wärmeäquivalent $A = 4{,}19 \cdot 10^7$ erg/kal zu dividieren; man erhält so

$$c_v = 3 \text{ kal/grad} \;\ldots\ldots\ldots 19)$$

Die Gleichungen 18) und 19) haben sich an einatomigen Gasen (Quecksilberdampf, Argon) gut bestätigt.

13. Der Gleichverteilungssatz. Wir sahen in der vorhergehenden Nummer, wie die Statistik über die Thermodynamik hinausführt, indem sie die Art der Abhängigkeit der Energie von der Temperatur bestimmt, was die reine Thermodynamik nie leistet. Die Frage ist, wie sie diese Aufgabe auch für feste und flüssige Körper, mehratomige Gase usw. lösen kann. Dies führt uns mitten in die komplizierte Frage nach den Molekularkräften hinein. Mangels eines besseren Ausweges haben hier Maxwell, Boltzmann und Gibbs mit einer Hypothese eingesetzt, welche eng an den Wiederkehreinwand anschließt. Wir wollen hier nur ihr wichtigstes Ergebnis aussprechen, den Satz von der gleichmäßigen Verteilung der Energie. Alle Freiheitsgrade, welche die Moleküle eines Körpers haben, sollen danach im Falle des Gleichgewichts die gleiche mittlere Energie besitzen, deren Betrag allein von der Temperatur des Körpers abhängt.; nach Belieben kann man dabei die Energie für einen Freiheitsgrad nach der Zeit oder über alle gleichartigen Freiheitsgrade (z. B. die Komponenten q_x aller Moleküle) für einen bestimmten Moment mitteln. Das Molekül eines einatomigen Gases hat z. B. drei für die Energie in Betracht kommende Freiheitsgrade, seine drei Geschwindigkeitskomponenten. Ihnen kommen von der kinetischen Energie $\frac{1}{2}mq^2$ die Anteile $\frac{1}{2}mq_x^2$, $\frac{1}{2}mq_y^2$, $\frac{1}{2}mq_z^2$ zu. Nach dem Maxwellschen Verteilungsgesetz Gleichung 9) und nach Gleichung 16) ist für jeden dieser Beträge der Mittelwert gleich $\frac{1}{2}kT$. Dies ist somit die mittlere Energie jedes Freiheitsgrades in einem Körper von der Temperatur T.

Dieser Gleichverteilungssatz hat glänzende Bestätigungen erfahren. Hat nämlich ein Molekül p Freiheitsgrade, so ist danach seine mittlere Energie $\frac{p}{2}kT$ und die Energie pro Mol des Körpers nach 14)

$$E = \frac{N}{n}\frac{p}{2}RT = \frac{p}{2}RT.$$

Die spezifische Wärme ist somit $\frac{p}{2}R$. Dem Molekül eines zweiatomigen Gases (H_2, O_2) muß man z. B. 5 Freiheitsgrade zuschreiben, nämlich außer den drei Komponenten der Schwerpunktsgeschwindigkeit noch zwei Komponenten der Drehgeschwindigkeit (eine Drehung um die Verbindungslinie der beiden Atome wird offenbar nicht angeregt, sonst wäre sie ein sechster Freiheitsgrad). So wird hier die spezifische Wärme $c_v = \frac{5}{2}R \frac{\text{erg}}{\text{grad}} = 5\frac{\text{kal}}{\text{grad}}$, woraus nach der schon erwähnten Beziehung $c_p - c_v = R$

$$\frac{c_p}{c_v} = 1{,}4$$

folgt. Auch dieser Wert findet sich bestätigt. Bei einatomigen festen Körpern hat aber das Molekül neben seiner kinetischen Energie noch eine von seinen drei Koordinaten abhängige potentielle Energie, so daß die Gesamtenergie von sechs Freiheitsgraden abhängt. Daraus folgt dann, daß seine spezifische Wärme $c_v = 3R \frac{\text{erg}}{\text{grad}} = 6\frac{\text{cal}}{\text{grad}}$ ist. Dies aber stimmt vollständig

mit dem Gesetz von Dulong und Petit überein.

14. Widersprüche gegen den Gleichverteilungssatz. Aber über diesem so glänzend scheinendem Bilde schweben doch, um ein Bild von Lord Kelvin zu gebrauchen, düstere Wolken. Warum, so muß man fragen, entspricht der Bindung der beiden Atome im Wasserstoffmolekül kein Freiheitsgrad? Die einzige mögliche Antwort lautet, daß die Festigkeit der Bindung jede Bewegung gegeneinander verhindert. Die Erscheinung der Dissoziation aber zeigt, daß es vollkommen feste Bindungen nicht gibt und schon die geringste Beweglichkeit würde c_v von 5 auf 7 steigern. Ferner gilt das Dulong-Petitsche Gesetz fast ausnahmslos bei höheren Temperaturen, aber schon bei Zimmertemperatur weicht ein Körper wie Diamant erheblich davon ab, und bei tiefen Temperaturen werden nach Forschungen von Nernst die Abweichungen immer allgemeiner und beträchtlicher. Schließlich aber — und das gab den ersten Anstoß zur Quantentheorie — führt der Gleichverteilungssatz in der Strahlungstheorie zu vollkommen unmöglichen Resultaten.

15. Das Versagen des Gleichverteilungssatzes beim Strahlungsgesetz. Seit Kirchhoff ist bekannt, daß sich in einem allseitig von gleichtemperierten Körpern begrenzten Hohlraum ein Strahlungszustand einstellt, der lediglich abhängt von der Temperatur der Wände. Deren sonstige Beschaffenheit ist völlig gleichgültig. Man schreibt dieser Hohlraumstrahlung dieselbe Temperatur zu wie den Wänden. Es sind in ihr alle Strahlungsarten vom äußersten Ultrarot bis zum äußersten Ultraviolett vertreten, wenngleich die Intensität nach beiden Grenzen zu sehr stark abklingt. In einem von vollkommen spiegelnden Wänden umgebenen Hohlraum erhält sich eine Hohlraumstrahlung von beliebiger Temperatur dauernd, wenn sie einmal hergestellt ist. Wegen der Unabhängigkeit dieser Strahlung von allen besonderen Körpereigenschaften ist es eine so wichtige Frage, wie ihre Energie von der Temperatur abhängt, und wie sie sich über das Spektrum verteilt. Auf die erste Frage antwortet das Stephan-Boltzmannsche Gesetz, daß die Gesamtenergie proportional zu T^4 ist. Ueber die zweite Frage gibt das Wiensche Verschiebungsgesetz insofern Auskunft, als es lehrt, wie aus der Energieverteilung bei einer Temperatur auf die Verteilung bei irgendeiner anderen geschlossen werden kann. So weit führt die reine Thermodynamik in Verbindung mit der Optik. Darüber hinaus muß man zur Statistik greifen.

Ein Verfahren, dies Problem anzugreifen, verdanken wir Jeans. Bekanntlich setzen sich alle Bewegungen einer an den Enden fest eingespannten Saite aus einer unendlich großen Zahl zueinander harmonischen Eigenschwingungen zusammen. Jede Eigenschwingung kann nach Amplitude und Phase unabhängig von den anderen angeregt werden, entspricht somit zwei Freiheitsgraden. Dasselbe gilt mit unwesentlichen Verallgemeinerungen auch für die elektromagnetischen Schwingungen in einem vollkommen spiegelnden Würfel, nur hat hier jede Eigenschwingung vier Freiheitsgrade. Ueberträgt man auf das Strahlungsgleichgewicht im Würfel den Satz, daß jedem Freiheitsgrad die Energie $\frac{1}{2} k\tau$ entspricht, so erhält man offenbar für jede endliche Temperatur eine unendlich große Gesamtenergie — ein offenbar unmögliches Ergebnis. Nun kann man ja vielleicht gegen diese Uebertragung seine Bedenken haben, aber Planck und andere sind auf ganz anderen Wegen unter Voraussetzung des Gleichverteilungssatzes immer wieder zu demselben, unmöglich richtigen Resultate gelangt.

16. Die Quantentheorie. Die Rettung aus allen diesen Nöten will nun die Quantentheorie bringen. Freilich stellt sie zurzeit noch ein buntes Konglomerat aus den verschiedenartigsten, einander zum Teil widersprechenden Ansätzen dar. Ihren Namen trägt sie, weil auf jeden Fall eine Größe, welche man bisher für stetig veränderlich hielt, jetzt in Elementarquanten eingeteilt werden muß. Planck z. B. leitete sein berühmtes Strahlungsgesetz zuerst mit Hilfe der Annahme ab, daß die Emission und Absorption von Strahlungsenergie nach Energiequanten von der Größe

$$\varepsilon = h\nu \ (h = 6{,}548 . 10^{-27} \text{ erg/sec})$$

erfolgt, wenn ν die Schwingungszahl der Strahlung bedeutet. Später zeigte er, daß man mit dieser Annahme für die Emission allein auskommt. Nach Sommerfeld soll statt dessen bei gewissen molekularen Vorgängen (lichtelektrischer Effekt, Auslösung von Kathodenstrahlen durch Röntgenstrahlen und umgekehrt) das Wirkungsintegral des Hamiltonschen Prinzipes stets den Wert h haben. Auf alles dies können wir hier nicht näher eingehen. Uebereinstimmung herrscht aber über den Ersatz des Gleichverteilungsgesetzes, wenigstens soweit die Freiheitsgrade zu rein periodischen Schwingungen gehören, wie etwa die Freiheitsgrade des Jeansschen Würfels. Ist nämlich ν wiederum die Schwingungszahl, so wird dem Freiheitsgrad die mittlere Energie

$$\frac{1}{2}\,\frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 20)$$

zugeschrieben, ein Wert, welcher zwar für Temperaturen, welche groß gegen $\frac{h\nu}{k}$ sind, in $\frac{1}{2}$ kT übergeht, sonst aber stets kleiner ist und besonders für den Fall, daß T klein gegen $\frac{h\nu}{k}$ ist, exponentiell $\left(\text{d. h. wie } \frac{1}{2} h\nu e^{-\frac{h\nu}{kT}}\right)$ verschwindet. So erklärt es sich, weshalb das Gesetz von Dulong und Petit um so besser gilt, je höher die Temperatur ist, während es bei tiefen Temperaturen gänzlich versagt. Einstein, Nernst und Lindemann, Born und von Kármán, sowie Debye haben in den letzten Jahren gezeigt, daß die Abhängigkeit der spezifischen Wärme von der Temperatur mit diesem Energieausdruck übereinstimmt. Seine glänzendste Bestätigung liegt aber im Planckschen Strahlungsgesetz. Einmal nämlich wird die Gesamtenergie der Hohlraumstrahlung trotz der unendlich vielen Eigenschwingungen endlich, weil der Ausdruck 20) mit wachsender Schwingungszahl sehr stark abnimmt. Die sehr schnellen Schwingungen, deren unendlich große Zahl den genannten Widerspruch herbeiführte, erhalten danach überhaupt keine Energie. Man kann aber darüber hinaus nach der Energie derjenigen Freiheitsgrade fragen, deren Schwingungszahl zwischen ν und $\nu + d\nu$ liegen. Die Anwendung des Ausdruckes 20) zeigt dann, daß die Energiedichte, soweit sie von der Strahlung des genannten Spektralbereiches herrührt, gleich

$$8\pi h \left(\frac{\nu}{c^3}\right)^3 \frac{d\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1} \quad \ldots\ldots\ldots 21)$$

ist. Dies Plancksche Strahlungsgesetz hat sich empirisch glänzend bestätigt, aus ihm sind die schon mitgeteilten Werte der universellen Konstante h und k berechnet.

Literatur. **L. Boltzmann,** *Vorlesung über Gastheorie, 2. Bd. Leipzig 1896 bis 1898.* — **J. W. Gibbs,** *Elementary principles in statistical mechanics. New York-London 1902. Deutsche Uebersetzung von E. Zermelo. Leipzig 1905.* — **J. H. Jeans,** *Dynamical theory of gases. Cambridge 1904.* — **M. Planck,** *Theorie der Wärmestrahlung. Leipzig 1906.* — **P. und T. Ehrenfest,** *Encyklopädie der math. Wissenschaften, IV, 2, II. Heft 6. Begriffliche Grundlagen der statistischen Auffassung in der Mechanik. 1912.* — **Dieselben,** *Ueber zwei bekannte Einwände gegen das Boltzmannsche H-Theorem. Phys. Zeitschrift,* **8**, *311, 1907.* — **M. Laue,** *Thermodynamische Betrachtungen über Interferenzerscheinungen. Ann. d. Phys.* **20**, *365, 1906. Verh. d. D. Phys. Ges.* **9**, *606, 1907.* — **A. Sommerfeld,** *Das Plancksche Wirkungsquantum und seine allgemeine Bedeutung für die Molekularphysik. Verh. d. D. Phys. Ges.* **13**, *1074, 1911.* — **M. Planck,** *Ueber neuere thermodynamische Theorien. Leipzig 1912.* — **E. Zermelo,** *Ueber einen Satz der Dynamik und die mechanische Wärmetheorie. Wied. Ann.* **57**, *485, 1896 und* **59**, *793, 1896. Erwiderung* **Boltzmanns** *darauf in Wied. Ann.* **57**, *773 und* **60**, *392, 1897.* — **A. Einstein,** *Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme. Ann. d. Phys.* **22**, *180 und 800, 1907.* — **M. Born und Th. von Kármán,** *Ueber Schwingungen in Raumgittern. Phys. Zeitschr.* **13**, *297, 1912. Vergl. dazu eine Arbeit non* **P. Debye** *in den Ann. d. Phys.* **39**, *1912 (noch nicht erschienen).* — **W. Nernst und F. A. Lindemann,** *Untersuchungen über die spezifische Wärme bei tiefen Temperaturen. Berl. Ber., 1910, S. 247, 262; 1911, S. 306, 316, 494.* — **M. Planck,** *Ueber die Begründung des Gesetzes der schwarzen Strahlung. Ann. d. Phys.* **37**, *642, 1912.*

M. v. Laue.

Staubfälle.

Sie finden nicht selten statt. Manchmal sind sie kosmischer, meist aber terrestrischer Natur. In diesem Fall können sie von Vulkanen stammen, wie sich z. B. der Staub des Krakatau im Jahre 1883 über die ganze Erde verbreitet hat; oder aber sie können aus Wüsten stammen, wie z. B. der Saharastaub in ganz Zentraleuropa nichts gar Seltenes ist. Uebrigens wird der Löß als eine Staubablagerung angesehen. Vgl. die Artikel „Meteoriten", „Vulkanismus", „Atmosphäre" und „Gesteinseinteilung".

Steenstrupp

Johann Japetus Smith.

Geboren am 8. März 1813 zu Vaug in Norwegen, gestorben am 20. Juni 1897 in Kopenhagen. Er war bis 1845 Lektor für Mineralogie in Sorö und wurde dann Professor der Zoologie und Direktor des zoologischen Museums in Kopenhagen. 1867 wurde er zum Staatsrat ernannt und setzte sich 1885 zur Ruhe. Seine Arbeiten liegen auf dem Gebiete der Zoologie und der Urgeschichte und zeichnen sich durch eine Reihe von neu entdeckten Tatsachen aus. Besonders wichtig sind seine Abhandlungen über das Vorkommen des Hermaphroditismus in der Natur (Kopenhagen 1846) und über den Generationswechsel, als dessen Entdecker er

anzusehen ist (daselbst 1842). Außerdem arbeitete er noch über die Cephalopoden, über niedere Schmarotzerkrebse (mit Lütken Kopenhagen 1861), über die Wanderung der Augen bei den Flundern (1864) und über die vorgeschichtliche Fauna und Flora Dänemarks. Besonders interessierte ihn auch die Untersuchung der Torfmoore und der Kjökkenmöddinger Dänemarks (Kopenhagen 1886), bei der er nicht nur die damalige Tier- und Pflanzenwelt, sondern auch die Erzeugnisse der früheren Kultur berücksichtigte. Er schrieb ferner noch: Yak-Lungta bracteaterne. Kopenhagen 1892.

Literatur. ***Carus,*** *Geschichte der Zoologie. München 1872.* — ***Burckhardt,*** *Geschichte der Zoologie. Leipzig 1907.*

W. Harms.

Stefan

Josef.

Geboren am 24. März 1835 in St. Peter bei Klagenfurt, gestorben am 7. Januar 1893 in Wien. Er studierte in Wien, war seit 1858 Privatdozent für mathematische Physik an der Universität Wien und gleichzeitig Lehrer der Mathematik und Physik an der dortigen Oberrealschule; 1863 wurde er zum ordentlichen Professor der Physik an der Wiener Universität ernannt. Stefan war Mitglied der Kommission zur Erforschung des adriatischen Meeres. Stefans Arbeiten beschäftigen sich vorzugsweise mit der Theorie der Gase, der Wärmeleitung, Diffusion, Verdampfungsgeschwindigkeit. Das von ihm 1879 veröffentlichte Temperaturgesetz der Gesamtstrahlung eines heißen Körpers trägt seinen Namen.

Literatur. *Nekrolog von* ***Süss,*** *Wien. Akad. Alm. 43.* — ***Obermayer,*** *Zur Erinnerung an Joseph Stefan, Wien 1893.*

E. Drude.

Stegocephalen.

1. Umfang. 2. Organisation: a) Schädel. b) Stammesskelett. c) Gürtel- und Extremitätenskelett. d) Hautverknöcherungen. 3. Systematik. 4. Verwandtschaft.

1. Umfang. Die Stegocephalen sind ausgestorbene Tiere der Steinkohlen-, der Perm- und der Triaszeit, die man zu den Amphibien rechnet. Besonders charakteristisch ist für sie das breite, von Schläfenlöchern nicht durchbrochene Schädeldach, auf welches sich auch der Name bezieht. Ein solches Schädeldach ist „stegocrotaph" (Gegensatz „zygocrotaph", d. h. mit Schläfendurchbrüchen versehen).

Unter der Bezeichnung wurden früher Gruppen zusammengefaßt, die man jetzt als genetisch getrennt gleichwertig nebeneinander stehen läßt; es sind insbesondere die Branchiosaurier (Oberkarbon bis Perm), die Mikrosaurier s. lat. (Oberkarbon bis Perm) und die temnospondylen und stereospondylen Stegocephalen (Unterkarbon bis Rhät[1])).

Es sind etwa 150 Gattungen mit gegen 400 Arten beschrieben. Die Größe erwachsener Tiere schwankt zwischen wenigen Zentimetern und etwa 4 m, ja Palaeosiren Geinitz soll nach A. Fritsch etwa 15 m lang geworden sein. Die Stegocephalen machen einen wesentlichen und wichtigen Bestandteil der ältesten Tetrapodenfaunen aus. Es sind land-, sumpf- und süßwasserbewohnende Tiere. Von einigen derselben ist die zwar noch nicht genügend gestützte Ansicht ausgesprochen worden, sie seien Meeresbewohner gewesen (langschnauzige Labyrinthodonten nach Wiman, z. B. Aphaneramma und Lonchorhynchus).

2. Organisation. 2a) Schädel. Das Schädeldach besteht meist aus der Höchstzahl möglicher Deckelemente. Frontalia und Parietalia sind fast immer, die anderen Elemente stets paarig. Als große Ausnahme kann das Ethmoid zwischen den Frontalia an die Außenfläche treten (Osteophorus). Die Parietalia umschließen das Parietalloch. Hinter den Parietalia liegen die Dermo-Supraoccipitalia (Miall führt diesen Namen schon 1878 ein, neuerdings hat sich zwar die neue Broomsche Bezeichnung Postparietale verbreitet, auch „supraoccipital plates" oder fälschlicherweise paariges Supraoccipitale genannt), seitlich von ihnen und hinter den Supratemporalia liegen die Tabularia an der hinteren Schädeldachkante. Diese Kante wird lateralwärts vom Squamosum fortgeführt. Die beiden erstgenannten Elemente können nach rückwärts vorspringen. Ein Intertemporale kommt vor. Die übrigen Deckknochen brauchen nicht alle genannt zu werden. Bei einer großen Anzahl von nicht kiementragenden Stegocephalen ist an der hinteren Umgrenzung der äußeren Nasenöffnung ein Septomaxillare vorhanden. Wenige Stegocephalen besitzen eine Internasalgrube (Acanthostoma, Dasyceps, Trematops) von zum Teil bedeutender Größe, welche wahrscheinlich wie bei vielen Urodelen und Anuren eine Internasaldrüse aufnahm, deren

[1]) Rhinosaurus Jasikovii Fischer von Waldheim wird aus dem „Oolith" (d. h. Jura) der Gegend von Simbirsk in Rußland angeführt, aber der genaue Fundort wird nicht genannt und ohne Gegenbeweis möchte ich annehmen, daß diese scheinbare Ausnahme eines jurassischen Stegocephalen auf einem Irrtum der Altersbestimmung beruht.

Fig. 1. Branchiosaurus amblystomus Credner aus dem sächsischen Perm. a Restauration einer Larve mit Kiemen, b erwachsenes Skelett. Natürliche Größe. c Schädel von unten. $^2/_1$ natürlicher Größe. Nach ~~Zittel~~

Fig. 2. Amphibamas grandiceps Cope. Carbon von Illinois. Nach R. L. Moodie.

klebriges Sekret die Zunge zum Insektenfang geeignet machte. Das Schädeldach der Stegocephalen und der Cotylosaurier (primitivste und älteste Reptilien) ist prinzipiell nicht verschieden. Ein aus kleinen Knochenplättchen bestehender Sklerotikalring kommt nicht selten vor. — Der Gaumen zeichnet sich durch das große und lange Parasphenoid aus, welches vorn mit den Vomeres zusammentrifft; die relativ kleinen Pterygoide bleiben weit getrennt. Alle Gaumenknochen können bezahnt sein. Die Schädelbasis besteht hauptsächlich aus dem Basisphenoid, ein Basioccipitale ist nur ausnahmsweise und klein bekannt. Die beiden Condyli des Hinterhaupts werden von den Exoccipitalia gebildet. Diese und die Opisthotica (= Paroccipitalia) setzen die Hinterseite des Schädels zusammen. Das Supraoccipitale ist selten verknöchert, meist bleibt eine Lücke an der Stelle des im Leben knorpeligen Elements. Das zwölfte Gehirnnervenpaar fehlt den Stegocephalen (konstatiert durch Huene bei Eryops und Cacops) wie den Amphibien im Gegensatz zu den Reptilien. Die Ohröffnung ist bald nach hinten, bald nach oben gerichtet, in letzterem Falle kommen dadurch Einkerbungen an der hinteren Schädelkante zustande, sie können sogar vom Tabulare umwachsen werden (Cacops, Trematops, Dissorophus, Cyclotosaurus), so daß Schädelöffnungen von bedeutender Größe entstehen, die an Schläfendurchbrüche erinnern. — An der Zusammensetzung des Unterkiefers beteiligen sich sämtliche möglichen Elemente, also auch Praearticulare Williston - Goniale Gaupp und Complementare; das Spleniale pflegt in die Symphyse einzutreten. — Die Zähne sind meist spitz konisch und rund im Querschnitt, selten flach oder komprimiert,

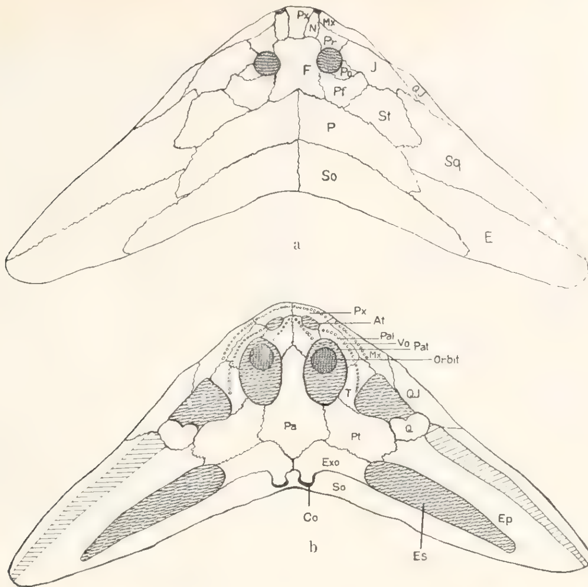


Fig. 3. Diplocaulus aus dem Perm von Texas. a von oben, b von unten. $^1/_3$ natürlicher Größe. Nach R. L. Moodie.

häufig besitzen sie tiefe Dentineinstülpungen, daher kommt die Bezeichnung Labyrinthodontia für die eigentlichen Stegocephalen. — Die Deckknochen des Schädels und des Unterkiefers (wie auch des sekundären Brust-Schultergürtels) zeigen häufig Skulptur. In ers-~~letz~~tere ist ein System von Schleimkanälen eingefurcht.

2b) Stammesskelett. Das Stammesskelett zeigt bei den verschiedenen Gruppen von Stegocephalen sehr verschiedenartige Ausbildung. Der einzelne Wirbel kann aus einem (holoespondyl) oder aus mehreren (temnospondyl) Stücken bestehen. Die Wirbel entstehen ontogenetisch, wie durch Gadow an rezenten Amphibien nachgewiesen ist, aus 4 Paaren von Elementen, welche in den einzelnen Gruppen verschiedene Verwendung finden: Basidorsalia = oberer Bogen, Basiventralia = Hypozentrum, Interdorsalia = Pleurozentrum, Interventralia = Intercentrum pleurale (Fritsch); die beiden letzteren können als morphologisch zusammengehörig aufgefaßt werden. Bei den Stegocephalen s. str. bleiben mehrere zu einer Wirbeleinheit gehörige Stücke getrennt, und zwar: 1. Pleurozentra gut entwickelt, Hypozentrum kleiner als Pleurozentrum = rhachitomer Typus (Temnospondyli). 2. Vergrößerung des Hypozentrums bei gleichbleibenden Pleurozentren = embolomerer Typus (z. B. Cricotus, Diplovertebron). 3. Vergrößerung des Hypozentrums

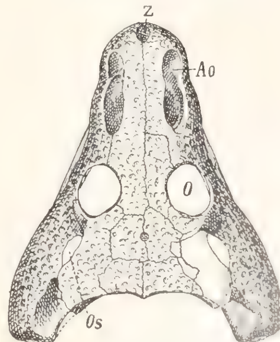


Fig. 4. Trematops Milleri Williston. Perm von Texas. $^3/_{10}$ natürlicher Größe. Nach ~~Zittel~~.

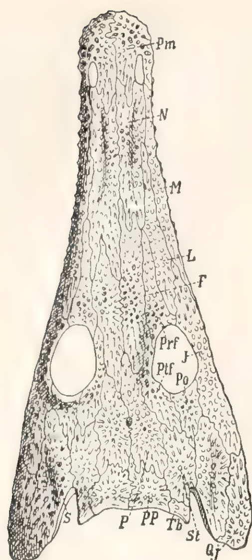


Fig. 5. Archegosaurus Decheni H. v. Meyer. Perm von Lebach. ½ natürlicher Größe. Nach Zittel.



Fig. 6. Dasyceps Bucklandi Lloyd. Aus dem Perm von Kenilworth. 1/6 natürlicher Größe.

und Reduktion der Pleurozentra stereospondyler Typus (Stereospondyli). Der röhrenförmige Wirbelkörper der phyllospondylen Branchiosaurier besteht aus dem Hypozentrum, Pleurozentra kommen nicht zur Entwicklung, der obere Bogen ist vom Hypozentrum getrennt. Die übrigen Amphibien sind holospondyl. 2 Fälle kommen vor: 1. Vereinigung des oberen Bogens und Hypocentrums zur Bildung des Wirbelkörpers, die Pleurozentra bilden den Intervertebralknorpel = Urodelentypus. Wie die Urodelen verhalten sich die Aistopoden und die Ptyoniden. 2. Vergrößerung des Pleurocentrums und Verkleinerung des Hypocentrums = Amniotentypus. Ebenso verhalten sich die Microbrachiden und die Hylonomiden. Die Wirbel von Lysorophus nähern sich dem Urodelentypus, nur mit dem Unterschied, daß Wirbelkörper (Hypozentrum) und oberer Bogen nicht wie dort verwachsen resp. gemeinsam den Wirbelkörper bilden, sondern getrennt bleiben und daß die Rippenartikulation wie bei den Microsauriern ist. — Die Rippenartikulation ist bei den Branchiosauriern und Stereospondylen einköpfig intravertebral, bei den Aistopoden und Mikrosauriern zweiköpfig mit meist intervertebraler Artikulation des Capitulum und bei den Temnospondylen zweiköpfig intravertebral wie bei den meisten Reptilien. Processus uncinati der Rippen kommen vor bei Aistopoden, Microsauriern, Temnospondylen und Stereospondylen.

2c) Gürtel- und Extremitätenskelett. Der primäre und der sekundäre

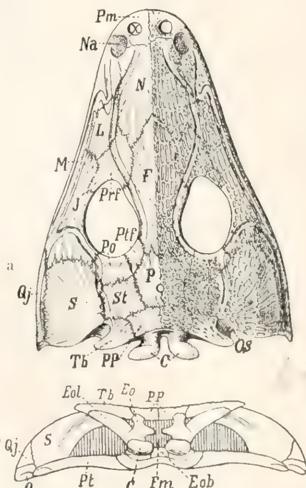
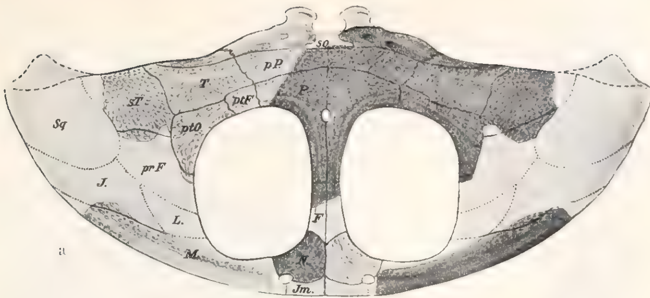


Fig. 7. Mastodonsaurus giganteus Jaeger. Deutsche Lettenkohle. Stark verkleinert. a von oben, b von hinten. Nach Zittel.



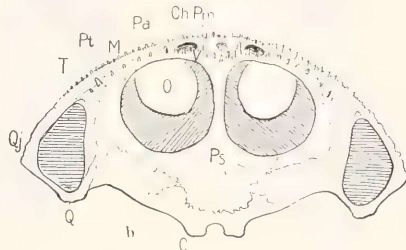


Fig. 8. Schädel von Plagiosternum. a Plagiosternum granulosum Fraas, von oben, aus dem obersten Muschelkalk von Crailsheim. Nach Fraas. $^2/_9$ natürlicher Größe. b Plagiosternum pulcherrimum Fraas, von unten, aus dem mittleren Keuper von Pfaffenhofen. Etwa $^1/_5$ natürlicher Größe. Nach Fraas und Jaekel.

Brust-Schultergürtel ist vorhanden, wo nicht die Extremitäten überhaupt verloren gegangen sind. Interclavicula und Claviculae pflegen große Platten mit Hautskulptur zu sein. Auch das Cleithrum ist von Branchiosauriern, Microsauriern und Temnospondylen bekannt. Es pflegt nur ein einziges coracoidales Element verknöchert zu sein. Verknöcherter Carpus findet sich bei den Temnospondylen. Vier-und fünffingerige Hand kommt vor. — Der Beckengürtel ist an einem einzigen Sakralwirbel befestigt. Das Becken ist bei den einzelnen Gruppen in sehr verschiedenem Grade verknöchert. Verknöcherter Tarsus findet sich bei den Temnospondylen. Der Fuß hat 5 Zehen.

2d) Hautverknöcherungen. Skulpturierte Rücken- und Bauchpanzerung kommt vor, aber auch glatte oder skulpturierte Beschuppung. Die ventralen Hautossifikationen sind meist zu Schuppen- oder Stäbchenreihen angeordnet, die nach vorn in der Medianlinie konvergieren und bilden auf diese Weise einen Abdominalpanzer, der den Bauchrippen der Reptilien homolog ist. Aber die Panzerung kann auch fehlen.

3. Systematik.

Ordnung **Holospondyli** Schwarz 1908 (Oberkarbon und Perm).

Unterordnung Microsauria Dawson.
- Familie Hylonomidae, z. B. Hylonomus, Seeleya, Richodon, Orthocosa.
- Familie Microbrachidae, z. B. Microbrachis, Tuditanus, Cocytinus, Limnerpeton, Lepterpeton, Pleuroptyx, Eurythorax.
- Familie Ptyonidae (eventuell Unterordnung), z. B. Ptyonius, Urocordylus, Oestocephalus, Scincosaurus, Fritschia.

Unterordnung Aistopoda Miall (Oberkarbon und Perm).
- Familie Ophiderpetontidae, z. B. Ophiderpeton, Thyrsidium.
- Familie Molgophidae, z. B. Molgophis.
- Familie Phlegethontiidae, z. B. Phlegethontia, Dolichosoma.

Unterordnung Nectridei Miall (Perm).
- Genera Diceratosaurus (eventuell Familien repräsentierend), Keraterpeton, Diplocaulus.

Ordnung **Branchiosauridae** Fritsch (Perm). Branchiosaurus, Protriton, Melanerpeton, Pelosaurus, Micrepeton, Eumicrerpeton, Apateon, Mazonerpeton.

? Ordnung **Lysorophidae** (Perm, Oberkarbon).



Fig. 9.

Lysorophus, Gymnarthrus, Cardiocephalus.

Ordnung **Temnospondyli** Zittel (Oberkarbon bis Perm).
Familie Eryopidae,
z. B. Eryops, Rhynesuchus, Parioxis, Anisodexis, Acheloma.
Familie Trimerorhachidae.

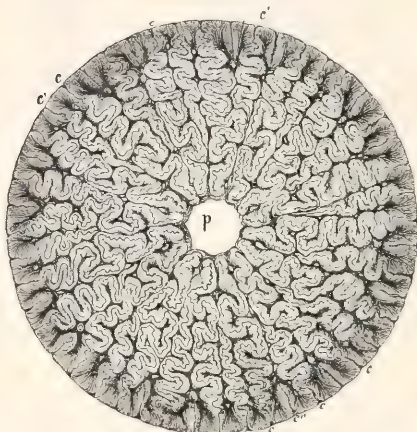


Fig. 10.

Fig. 9. Seeleya pusilla Frisch. Aus der Gaskohle von Nyrschan. Restauration. Nach Zittel.
Fig. 10. Querschnitt durch einen Zahn von Mastodonsaurus Jaegeri. $^3/_1$ natürlicher Größe. Nach R. Owen.

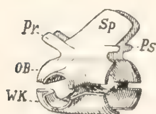


Fig. 11a.

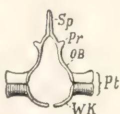


Fig. 11b.

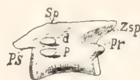


Fig. 13a.



Fig. 13b.

Fig. 11. Phyllospondyler Rumpfwirbel von Branchiosaurus. a von der Seite, b von vorne. Nach Zittel.
Fig. 12. Lepospondyler Rumpfwirbel von Hylonomus. a von der Seite, b Querschnitt. Nach Zittel.
Fig. 13. Rumpfwirbel von Diplosaulus. a von der Seite, b von oben. Nach Zittel.
Fig. 14. Schwanzwirbel von Urocordylus.
Fig. 15. Rhachitomer Rumpfwirbel von Eryops. a von links, b von hinten. Nach Zittel.

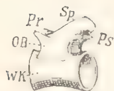


Fig. 12a.



Fig. 12b.

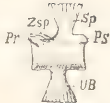


Fig. 14.

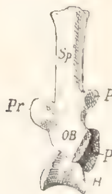


Fig. 15a.



Fig. 15b.

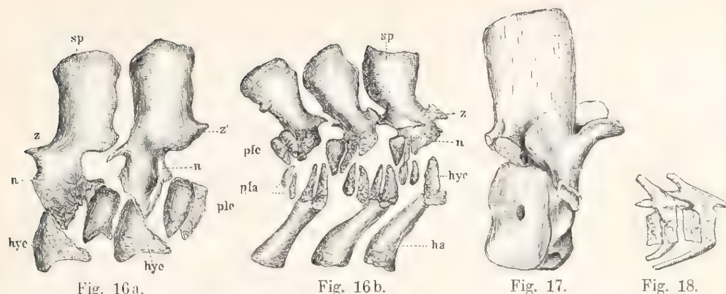


Fig. 16. Rhachitomer Wirbel von Archegosaurus. a Rumpf, b Schwanz. Nach Zittel.
Fig. 17. Stereospondyler Rückenwirbel von Loxomma. Unterkarbon von Schottland. Nach Zittel.
Fig. 18. Embolomere Wirbel von Diplovertebron. Gaskohle von Nyrschan. Nach ~~Zittel~~.

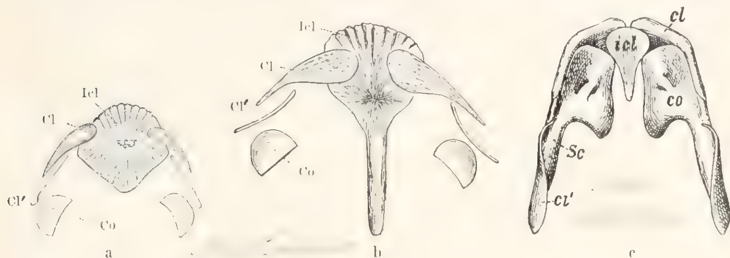


Fig. 19. Schultergürtel: a von Branchiosaurus, b von Melanerpeton, c von Cacops ~~Nach Zittel~~. Icl — Interclavicula, Cl — Clavicula, Cl' — Cleithrum, Co — Coracoid.

z. B. Trimerorhachis, Tersomius, Zatrachis, Actinodon, Sclerocephalus.

Familie Archegosauridae,
Archegosaurus, Discosaurus, Gondwanosaurus.

Familie Dissorophidae,
Dissorophus, Cacops.

Familie Trematopsidae,
Trematops.

Familie Aspidosauridae,
Aspidosaurus.

Familie Melosauridae,
z. B. Melosaurus, Osteophorus, Dasyceps, Chelydosaurus, Cochleosaurus, Nyrania.

Familie Cricotidae (eventuell Unterordnung),
z. B. Cricotus, Cricotillus, Diplospondylus, Sponylerpeton, Nummulosaurus, Eosaurus.

Familie Pleuristidae (eventuell Unordnung),
Pleuristion.

Ordnung **Stereospondyli** Zittel (Unterkarbon bis Rhät).

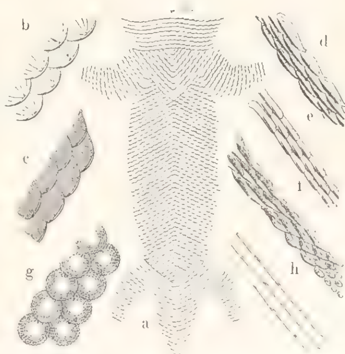


Fig. 20. a Bauchpanzer von Branchiosaurus, b Schuppen von Branchiosaurus, c von Hylonomus, d von Pelosaurus, e von Archegosaurus, f von Sclerocephalus, g von Discosaurus, h von Petrobates. Nach Zittel.

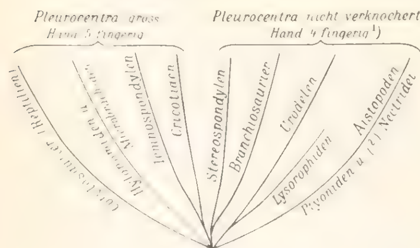
Familie Chauliodontia Miall (Unterkarbon bis Perm),
z. B. Anthracosaurus, Loxomma, „Erpetosuchus“ (Moodie), Platyops, Zygosaurus.

Familie Euglypta Miall (Trias),
z. B. Trematosaurus, Capitosaurus, Mastodonsaurus, Metoposaurus, Cyclotosaurus, Labyrinthodon, Rhytidosteus, Diadetognathus, Anaschisma, Eupelor, Pachygonia.

Familie Brachyopina Miall (Trias),
z. B. Brachyops, Micropholis, Rhinosaurus, Botriceps, Batrachosuchus.

Familie Plagiosternidae (Fraas) (Trias),
Plagiosternum.

4. Verwandtschaft. Zur Beurteilung am wichtigsten sind außer dem Schädel Wirbelsäule und Hand. Bei den Urodelen besteht der Wirbelkörper aus Hypozentrum + oberem Bogen, bei den Amnioten aus dem Pleurozentrum, welches bei den Urodelen nur den Intercalarknorpel bildet. Den Amnioten nähern sich die Temnospondylen am meisten, sie vermitteln aber auch am besten zwischen ihnen und den anderen Amphibien; sowohl die Embolomeren wie die Stereospondylen sind Uebertreibungen nach der einen oder der anderen Richtung, die sich aber beide von den Amnioten wie von den anderen Amphibien weiter entfernen, also sterile Zweige sind. Die aus dem Stammesskelett sich ergebenden Verwandtschaftsverhältnisse soll folgendes Schema auszudrücken suchen:



Es zeigt sich daraus, daß die verschiedenen Ordnungen und diejenigen Familien, die solchen phyletisch gleichwertig sind, unter sich mehr oder weniger parallele Ausstrahlungen eines Zentrums sind, von welchem gleichzeitig auch die Reptilien (und somit alle Sauropsiden und indirekt auch die Mammalia), ausgehen. Die Hylonomiden und Mikrobrachiden stehen den letzteren am nächsten, obwohl auch sie nach ihrem Gaumen sicher Amphibien sind. Die Temnospondylen können trotz außerordentlich vieler und bestechender Aehnlichkeiten ebenfalls nicht direkter Ausgangspunkt der Reptilien (Cotylosaurier) sein, weil ihnen wie allen Amphibien das zweite Hirnnervenpaar fehlt, weil sie ein lang gestieltes Parasphenoid und weit auseinanderliegende kleine Pterygoide haben, die sich nicht berühren (Reptilien haben kleines Parasphenoid und größere näherliegende Pterygoide) und weil ihr Wirbelkörper aus Hypozentrum + Pleurozentrum besteht (Reptilien: Pleurozentrum allein, das Hypozentrum hat sich als kleines „Interzentrum“, resp. daraus hervorwachsende Haemapophyse erhalten).

[1]) Bei den Cricotiden und Stereospondylen ist die Fingerzahl unsicher; bei Temnospondylen und Microsauriern sind 5 Finger nachgewiesen.

Literatur. **F. Broili,** *Permische Stegocephalen und Reptilien aus Texas. Palaeontographica* 51, *1904.* — **E. C. Case,** *Revision of the Amphibia and Pisces of the Permian of North America. Carnegie Institut of Washington, publication No. 146, 1911.* — **E. D. Cope,** *Zahlreiche kleinere Schriften über nordamerikanische Microsaurier und Stegocephalen (Zitate bei Case).* — **H. Credner,** *Die Stegocephalen und Saurier aus dem Rotliegenden des Plauenschen Grundes bei Dresden. Zeitschr. d. deutsch. geol. Ges., 1881 bis 1893.* — **E. Fraas,** *Die Labyrinthodonten der schwäbischen Trias. Palaeontographica* 35, *1889.* — **A. Fritsch,** *Fauna der Gaskohle und der Kalksteine der Permformation Böhmens, 4 Bde., 1883 bis 1901.* — **F. v. Huene,** *Beiträge zur Kenntnis des Schädels von Eryops. Anatom. Anzeiger* 41, *1912.* — **O. Jaekel,** *Ueber die Klassen der Tetrapoden. Zoolog. Anzeiger* 34, *1909.* — **L. C. Miall,** *Report on the structure and classification of the Labyrinthodonts. Brit. Assoc. Adv. Sci., 1873 und 1874.* — **R. L. Moodie,** *Eine Anzahl kleinere Schriften, einige Zitate s. bei Zittel S. 148.* — **H. Schwarz,** *Ueber die Wirbelsäule und die Rippen holospondyler Stegocephalen. Beitr. z. Pal. u. Geol. Oesterreich-Ungarns u. d. Orients* 21, *1908.* — **A. Thevenin,** *Les plus anciens quadrupèdes de France. Ann. de Paléont.* V, *1910.* — **S. W. Williston,** *Eine Anzahl Schriften, s. Zitate bei Case und Zittel.* — **K. A. v. Zittel,** *Handbuch der Paläontologie, Bd.* III, *1888.* — **Derselbe,** *Grundzüge der Paläontologie,* II, *2. Aufl. 1911 (Amphibien von F. Broili).*

Friedrich von Huene.

Stein

Friedrich Ritter von.

Geboren am 3. November 1818 zu Niemegk in Brandenburg, gestorben am 9. Januar 1885 zu Prag. Er studierte von 1838 bis 1841 in Berlin unter Johannes Müller und Lichtenstein und promovierte dort 1841. 1843 wurde er zum dritten Custos des Berliner zoologischen Mu-

seums ernannt und habilitierte sich 1848 dortselbst. 1850 erhielt er einen Ruf als ordentlicher Professor an die Forstakademie in Tharandt, folgte aber schon 1855 einer Berufung nach Prag, wo er dann auch bis zu seinem Tode blieb. Als er 1875 das Rektorat annahm, war er damit nach fast 200 Jahren der erste Rektor protestantischer Konfession. Er hat bedeutendes auf dem Gebiete der Protistenkunde geleistet. Vor allem hat er die alte Ansicht Ehrenbergs von den Einzelligen als sehr kleiner Metazoen durch vorzügliche Beobachtungen widerlegt.

Er schrieb: Die weiblichen Geschlechtsorgane der Käfer, Berlin 1847; Grundriß der organischen Naturgeschichte, Berlin 1849; Die Infusionstiere auf ihre Entwickelung untersucht, Leipzig 1854; Der Organismus der Infusionstiere, daselbst 1859 bis 1883, 3. Abt.; Ueber die Hauptergebnisse der neueren Infusorienforschung, Wien 1883.

Literatur. *Biographisches Lexikon d. Kaisertums Oesterreich, 38. Teil, 1879.*

W. Harms.

Steinheil

Carl August.

Geboren am 12. Oktober 1801 in Rappoltsweiler im Elsaß, gestorben am 14. September 1870 in München. Er studierte 1821 Jura in Erlangen, von 1822 bis 1825 Mathematik und Astronomie in Göttingen und Königsberg; von 1832 bis 1849 war er Professor der Mathematik und Physik in München, dann Sektionsrat und Vorstand des Departements für Telegraphie in Wien. Nach kurzem Aufenthalt in der Schweiz kehrte er 1852 nach München zurück, wo er als bayrischer Ministerialrat und technischer Beirat im Handelsministerium tätig war. Dort gründete er 1854 eine optisch-astronomische Anstalt und errichtete eine Privatsternwarte. Steinheil gilt als der Begründer der elektromagnetischen Telegraphie, er gebrauchte Induktionsströme und benutzte die Erde als Rückleitung.

Literatur. *Marggraf, Karl August Steinheil und sein Wirken, München 1888.*

E. Drude.

Stelzner

Alfred Wilhelm.

Geboren am 20. Dezember 1840 in Dresden; gestorben am 25. Februar 1895 zu Wiesbaden. Nach dem Besuch der Kreuzschule und der polytechnischen Schule seiner Vaterstadt bezog er 1859 die Bergakademie zu Freiberg. 1864 nahm er nach bestandener Bergmannsprüfung als Volontär an den Aufnahmen der k. k. geologischen Reichsanstalt in Niederösterreich teil, 1866 wurde er zum Bergingenieur in Freiberg ernannt. Fünf Jahre später folgte er einem Ruf als Professor für Mineralogie und Geologie an die Universität Cordoba in Argentinien und beteiligte sich dort auch an der geologischen Landesaufnahme. Bereits 1874 kehrte er als Nachfolger seines Lehrers B. v. Cotta als Professor der Geologie nach Freiberg zurück. Nach 21 Jahren erfolgreichster Lehrtätigkeit setzte ein Nierenleiden seinem Wirken allzufrüh ein Ziel.

Eine wissenschaftliche Bedeutung hat sich Stelzner erworben durch die hartnäckige Gegnerschaft und spätere Ueberwindung der Einseitigkeiten der Sandbergerschen „Lateralsekretionstheorie" der Erzlager. Nur sein früher Tod hinderte ihn, seine Vorlesungen und seine mit großer Gründlichkeit sowohl im Felde als am Mikroskop gesammelten Erfahrungen zu einem größeren Werke über die Erzlagerstätten zusammenzuarbeiten. Auf der Grundlage seiner Manuskripte hat aber später A. Bergeat seinen Plan ausgeführt und „Die Erzlagerstätten" (1904 bis 1906) herausgegeben.

Literatur. *Allgemeine Deutsche Biographie, 54, 474. — Zeitschrift für praktische Geologie, 1895, S. 201.*

K. Spangenberg.

Steno

Nikolaus.

Geboren am 10. Januar 1638 zu Kopenhagen; gestorben am 25. November 1687 zu Schwerin. Nach den ersten Studien in der Heimat widmete er sich hauptsächlich der Medizin in Holland, Paris, Deutschland, Ungarn und Italien und ließ sich 1666 in Florenz nieder. Dort wurde er bald Mitglied der Academia del Cimento und Leibarzt des Großherzogs. 1673 folgte er einem Rufe Christians V. als Professor der Anatomie nach Kopenhagen. Infolge der Mißhelligkeiten und Verfolgungen wegen seines 1669 erfolgten Übertritts zur katholischen Kirche kehrte er jedoch nach kurzer Zeit nach Florenz zurück, um sich vornehmlich theologischen Studien zu widmen. Später hielt er sich wieder in Norddeutschland, zuletzt in Schwerin auf. Von dort wurde sein Leichnam nach Florenz gebracht.

Seine theologischen Streitschriften und einige wichtigere anatomische Abhandlungen hätten ihn nicht so berühmt gemacht wie sein Werk De Solido intra Solidum naturaliter contento (Florenz 1669; Auszug daraus von Elie de Beaumont in Annales de sciences nat. 1831, XXV, 337). Hierin sind u. a. seine für die Mineralogie so außerordentlich wichtigen Beobachtungen am Bergkristall niedergelegt, die ihn zuerst die Unveränderlichkeit der Kantenwinkel und das Wachstum des Kristalles von außen her erkennen ließen. Ebenso weit eilte er seiner Zeit voraus mit eben darin enthaltenen geologischen Beobachtungen, wie über die Entstehung von

Versteinerungen, die Hebung der Gebirge und die Bildung der Täler.

Literatur. *Collectio monumentorum ad historiam litterariam pertinentium. Arezzo 1752.* — **Manni**, *Vita del litteratissimo Mgr. Stenone. Florenz 1775.* — **Fabroni**, *Vitae Italorum*, **III**. — *Biographie universelle* (**Michaud**), **40**, *S. 209.*

K. Spangenberg.

Stereoskopie.

1. Sehschärfe. 2. Tiefenwahrnehmung. 3. Orthoskopie. 4. Orthostereophotographie. 5. Stereoskopische Messung. 6. Stereoapparate.

1. Sehschärfe. Das Eigentümliche des stereoskopischen Sehens besteht darin, daß unsere beiden Augen einen dreidimensionalen Gegenstand gleichzeitig von zwei verschiedenen Standpunkten aus sehen, und daß die beiden natürlicherweise etwas voneinander verschiedenen Netzhautbilder in der Hirnrinde — und zwar der des Hinterhauptes — zu einer körperlichen Wahrnehmung vereinigt werden. Wollen wir also durch zwei Bilder, deren je eines einem Auge geboten wird, eine körperliche Wahrnehmung erzeugen, so müssen diese beiden Bilder gewisse Differenzen bieten, deren Größe abhängig ist von dem Seitenabstand der beiden Standpunkte, von denen aus die zwei Bilder desselben Gegenstandes aufgenommen wurden. Da beide Augen in der Stirnebene des Kopfes liegen, so kann man diesen Seitenabstand auch Frontal- oder Pupillendistanz — richtiger Drehpunktsabstand — nennen. Je größer dieser ist, um so hochgradiger sind die Bildverschiedenheiten, um so größer die Plastik, welche wir von einem körperlichen Objekt wahrnehmen. Nähern sich beide Augen oder Aufnahmeobjektive einander, so nimmt die Plastik ab, um beim Zusammenfallen (der Standpunkte) den Wert 0 zu erreichen, d. h. ein einäugiges stereoskopisches Sehen im strengeren Sinne gibts nicht.

Da unsere Augen seitlich im Kopf nebeneinander stehen, so können wir nur seitliche Bildverschiedenheiten als Plastik bewerten, während uns entsprechende Differenzen in den vertikalen Konturen auch dann keine körperliche Wahrnehmung vermitteln, wenn wir unsere Augen (durch Prismenkombinationen) übereinanderstellen.

Damit hängt es aufs engste zusammen, daß wir nur für vertikale Konturen ein stereoskopisches Sehen besitzen und für schräge doch nur insofern, als in jeder schrägen Kontur eine Vertikalkomponente enthalten ist. Für rein horizontal verlaufende Konturen, z. B. straff gezogene Telegraphendrähte, haben wir kein stereoskopisches Sehen. Die dreidimensionale Anordnung solcher Drähte erkennen wir aber, sobald wir uns darunter stellen und in der Richtung der Drähte blicken, diese also wieder in eine solche Lage uns gegenüber bringen, daß sie sich auf vertikalen Netzhautschnitten abbilden, ähnlich als ob sie sich senkrecht vor uns befänden.

Den Wert des stereoskopischen Sehens in dem dargelegten Sinne können wir nur verstehen, wenn wir uns klar machen, wie klein die Bildverschiedenheiten sein dürfen, um noch zur Wahrnehmung gelangen zu können. Wir werden sehen, daß dafür — theoretisch — eine Grenze nicht existiert.

Die Sehschärfe eines Auges bestimmen wir zahlenmäßig gewöhnlich mit Hilfe der Doppelobjektmethode, d. h. von zwei Sternen z. B. dürfen sich die Bilder in der Netzhaut nicht auf zwei benachbarten Netzhautzapfen abbilden, um getrennt zur Wahrnehmung zu gelangen, es muß vielmehr ein Zapfen dazwischen ungereizt bleiben. Liegen die Bilder — besser Reizmaxima — auf zwei unmittelbar benachbarten Zapfen, so würde die Wahrnehmung einer sehr kurzen Linie — nicht eines Doppelpunktes — sich ergeben. Je schmaler die Zapfen der Netzhaut sind, um so enger können die Reizmaxima aneinander rücken, um so näher dürfen sich die Sterne sein, um so geringere Entfernungen derselben voneinander können wir wahrnehmen, um so größer ist unsere Sehschärfe.

Nehmen wir nun an — die anatomischen Befunde geben uns dazu ein gewisses Recht —, daß die Querschnitte der Retinalzapfen 3 bis 4 μ betragen, so müssen also die Reizmaxima mindestens 5 μ voneinander bleiben; diesem Seitenabstand entspricht bei einer Knotenpunktsentfernung von 16 mm ein Winkel von 1 Minute: die Helmholtzsche Winkelminute als Durchschnittswert der (unokularen) Sehschärfe. Schmalere Netzhautelemente (oder größere Augenachsenlänge) ermöglichen höhere, überdurchschnittliche bis doppelte Sehschärfe. Nach obigem Prinzip konstruiert sind die Snellenschen Sehproben, deren Einzelheiten unter einer Breite von 1 W-m erscheinen, so daß der ganze Buchstabe — ein großes lateinisches E — für eine bestimmte Entfernung, z. B. unter 5 Minuten Seite und Höhe erscheinen, wozu $5 \times 5 = 25$ Zapfen nötig sind.

Mit anderen Probeobjekten, z. B. einfachen Haken ⊏ untersuchen wir ein Netzhautareal von nur etwa sechs Zapfen und zur Wahrnehmung der Oeffnung im Landoltschen Ring ◯ brauchen wir vielleicht unter günstigen Verhältnissen nur drei.

Etwas wesentlich anderes untersuchen wir,

wenn wir nach Wülfing noniusartig zwei Linien gegeneinander verschieben. Den bajonettartigen Knick der Linie können wir schon erkennen, wenn der zum Querstück des Bajonetts gehörige Winkel ca. 10 Sekunden, also etwa den sechsten Teil der Winkelminute beträgt. Wie eine solche hohe Unterscheidungsmöglichkeit erreicht werden kann, ist von Hering überzeugend nachgewiesen und als Wahrnehmung seitlicher Lageverschiedenheit bezeichnet; dabei ist es nicht nötig, daß die Noniusmarken vertikal stehen, bekanntlich kann man den Nonius — annähernd — ebenso genau bei Drehung um 90 Grad ablesen.

Etwas Aehnliches wie diese wesentlich verfeinerte Erkennungsfähigkeit unseres Auges für seitliche Lageverschiedenheiten haben wir in der binokularen Funktion der Wahrnehmungsfähigkeit für sagittale Lageverschiedenheiten, d. h. für Entfernungsdifferenzen im Sinne der dritten Dimension, nur mit dem Unterschiede, daß sich die den Entfernungsdifferenzen entsprechenden retinalen Bilddifferenzen auf beide Augen verteilen und wie oben dargelegt auf vertikale Konturen oder die Vertikalkomponenten schräger Konturen beschränken.

2. Tiefenwahrnehmung. Die Prüfung auf Vorhandensein und Feinheit der binokularen Tiefenwahrnehmung (Tw.) geschieht, wenn wir uns möglichst an die (unokular anstellbare) Noniusmethode anschließen, am einfachsten auf folgende Weise. In der oberen Hälfte eines Rahmens befindet sich in vertikaler Lage frei in der Mitte endigend eine Stricknadel. In der geradlinigen Verlängerung dieser befindet sich in der unteren Hälfte des Rahmens auf einem sagittal verschieblichen Schlitten mit Skala eine ebensolche. Bei Einstellung auf 0 bilden beide Nadeln also eine vertikale Linie, die sich in beiden Augen auf den mittleren Längsschnitten abbildet. Befindet sich der (zu untersuchende) Beobachter in 5 m Entfernung in der sagittalen Verlängerung des die Skala tragenden Schlittens und fixiert er das untere Ende der oberen feststehenden Stricknadel, so bildet sich die untere Stricknadel bei Annäherung an den Beobachter im rechten und linken Auge schläfenwärts vom Fixierpunkt ab (bitemporale symmetrische Querdisparation); bei Entfernung der unteren Nadel bildet sie sich in beiden Augen nasenwärts ab (binasale symmetrische Querdisparation). Aus der in Millimetern ablesbaren Entfernung der unteren Nadel (von der 0-Stellung), die stets richtig als „vorn" oder „hinten" erkennbar ist, gewinnt man einen Maßstab für die Feinheit des stereoskopischen Sehens. Bei Prüfung auf 5 m Abstand entsprechen 20 mm Tiefenverschiebung c 10″ = 0,8 μ Qd. Auf 2,5 m c 42″ = 3,25 μ. Hat man (von Hause aus oder durch künstliche Herabsetzung der Sehschärfe mittels Plusgläser) für die Ferne „normale" Sehschärfe ($^5/_5$ nach Snellen), so kann man unter normalen Verhältnissen noch 25 mm + und — Entfernungsdifferenz erkennen, was 25″ = 2 μ Qd. entspricht. Obige Werte erreicht man indes bei angenähert doppelter Sehschärfe (wie ich sie besitze) und einiger Uebung bald. Auf 2,5 m Entfernung erkenne ich bequem 3 bis 4 mm + und — Entfernungsdifferenz, mit „normaler" Sehschärfe 6 bis 8, mit halber über 20.

3. Orthoskopie. Bemerkenswert ist nun, daß man, um die Tiefenwahrnehmung im gleichen Grade wie die Sehschärfe zu schädigen, gar nicht nötig hat, beide Augen in ihren Funktionen zu beeinträchtigen, sondern daß es genügt, ein Auge zu schädigen, um die Funktion des stereoskopischen Sehens in demselben Grade zu schädigen, als ob beide Augen geschädigt wären.

Da wir nun — besonders durch die Arbeiten von C. Heß — berechtigt sind, eine ungleichstarke Akkommodation auf beiden Augen in Abrede zu stellen, so ergibt sich das Postulat, daß bei Anisometropie, d. h. (bei ungleicher Brechkraft beider Augen die Tw. leiden muß trotz normaler Sehschärfe jederseits. Dieses ist in der Tat der Fall. Hat jemand auf dem einen Auge Emmetropie (normale Brechkraft) und normale Sehschärfe, auf dem anderen aber + 2,0 D Uebersichtigkeit, so wird er auch auf diesem Auge (unokular geprüft) durch 2 D Acc normale Sehschärfe haben. Bei freiem Blick wird aber — wenn die Akkommodation stets auf beiden Augen gleich groß ist, entweder das eine oder das andere Auge scharf sehen, das nicht scharf eingestellte eine Ametropie von 2D, demnach eine Herabsetzung der Sehschärfe auf c $^1/_4$ haben. Die Tiefenwahrnehmung wird aber so leiden, als ob beide Augen $^1/_4$ Sehschärfe hätten, sie wird also nur c $^1/_4$ betragen. Bei der Ausbildung der Entfernungsmessermannschaften ist dies von ausschlaggebender Bedeutung. Auf meine Veranlassung wurden die Untersuchungsmethoden für solche Mannschaften in diesem Sinne nicht unwesentlich vervollständigt.

Wie scharf unsere klinischen Methoden in solchen Fällen die Voraussage stellen können, erhellt daraus, daß ich mehrfach bei erprobten Mannschaften ihre Leistungsfähigkeit aus den Augen bestimmte, was regelmäßig mit ihren Schießresultaten übereinstimmte.

Es ist vielleicht nicht zu viel gesagt, daß wir hier eine der höchsten Sinnesfunktionen und zu deren Untersuchung die feinsten und

doch einfachen Methoden vor uns haben. Durch Korrektion (optische) einer Refraktionsanomalie — durch entsprechende Einstellung der binokularen Instrumente für jedes Auge einzeln — ist die Sehschärfe jedes Auges ja nun meist auf die Norm und darüber zu heben. Damit ist jedoch nicht gesagt, daß ohne weiteres damit auch das stereoskopische Sehen ermöglicht wird. Zumal, wenn jemand das korrigierte Glas nicht immer trägt, nicht in der Kindheit schon angefangen hat, sich daran zu gewöhnen, vielleicht im Gegenteil durch unokulares Sehen, z. B. beim Mikroskopieren, Schießen und dergleichen einäugigen Beschäftigungen die Eindrücke des zweiten Auges absichtlich unterdrückt hat, wird er im stereoskopischen Sehen später wenig Befriedigendes leisten. Es ist ja das stereoskopische Sehen nur der höchste Grad der Ausbildung des binokularen Sehens und es kann trotz Isoemmetropie mit bester Sehschärfe doch die Tiefenwahrnehmung völlig fehlen. Solche Fälle sind es, die zu dauerndem oder zeitweisem (alternierendem) Schielen führen können. Solche Augen können gelegentlich noch binokulare Sammelbilder machen oder noch gröbere gemeinsame Funktionen zeigen, das Erkennen der dritten Dimension auf Grund der Querdisparation fehlt ihnen oft völlig.

Luftperspektive, Erfahrung und Uebung treten hier als mangelhafter Ersatz ein, die exakte Untersuchung ergibt den Defekt unwiderleglich. Am Messungsinstrument (dem stereoskopischen Entfernungsmesser) versagen solche Leute völlig.

Untersuchen wir mit obigem Stäbchenapparat Leute mit einäugigem Sehen — also z. B. Normale unter Verschluß eines Auges, so resultiert bei Annäherung der unteren Nadel nicht die Wahrnehmung größerer Nähe, sondern die der seitlichen Verschiebung: im Fall, daß mit dem rechten Auge gesehen wird, erfährt die Nadel eine scheinbare Verschiebung nach links, im Falle, daß mit dem linken Auge gesehen wird nach rechts.

Aus dieser W a h r n e h m u n g, welche also durch eine Modifikation der Noniusmethode zahlenmäßig meßbar ist, kann sich der Beobachter die V o r s t e l l u n g bilden, daß sich die untere Nadel in dem einen Falle nähere, im anderen entferne, doch gehört hierzu die Voraussetzung, daß sich die Verschiebung in der Medianebene abspielt, ist dies nicht der Fall, so kann eine scheinbare Rechtsverschiebung der Nadel dem rechten Auge sowohl durch eine Entfernung wie durch eine Annäherung vermittelt werden.

Der Umstand, daß trotz Isoemmetropie, guter Sehschärfe und richtiger Augenstellung das stereoskopische Sehen fehlen kann, spricht dafür, daß nicht nur möglichst vollkommene periphere Sinnesorgane (zwei gute und gleich gebaute Augen), sondern auch eine möglichst gute zentrale, d. h. interkortikale Verbindung im Gehirn vorhanden ist. Aus der Lehre der H e m i a n o p s i e wissen wir, daß Ausfall des einen, z. B. rechten Hinterhauptlappens (Fissura calcarina) Erblindung der rechten Hälften beider Netzhäute, also Ausfall der linken Hälften beider Gesichtsfelder bedingt. Die vertikale Trennungslinie der sehenden und blinden Hälften geht dabei aber oft nicht senkrecht durch den Fixierpunkt hindurch, sondern macht einen Bogen um diese wichtigste Stelle derart, daß die Sehschärfe nicht auch halbiert wird, sondern durch eine „Aussparung" im Bereich der erblindeten Hälften normal bleibt. Diese zweifellose klinische Tatsache hat die verschiedensten Deutungen erfahren. Je näher der die Hemianopsien bedingende Herd der Hirnrinde liegt, um so konstanter und größer ist die Aussparung, je näher er der Sehnervenkreuzung liegt, um so kleiner und seltener ist sie zu beobachten. Bei der bitemporalen (Chiasma-) Hemianopsie fehlt sie konstant. Die anatomischen Bedingungen der M-Aussparung haben wir also zwischen Chiasma und Cortex zu suchen, wo? ist noch nicht sicher entschieden. Das Wahrscheinlichste ist mir eine nervöse Doppelversorgung beider Maculae centrales retinarum, einer Doppelvertretung beider Stellen des schärfsten Sehens jedes Auges in jeder Hirnrinde, die auf die in Fig. 1 dargestellten Weise

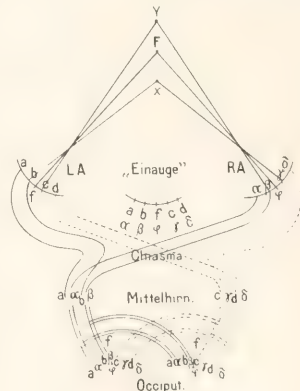


Fig. 1.

zustande kommen kann. Dabei kann an dieser Stelle unerörtert bleiben, ob die Kolla-

teralen schon im Chiasma, inner- oder oberhalb des Mittelhirns oder erst in der Hirnrinde sich abzweigen. In Figur 1 sind a und α, b und β, c und γ, d und δ, selbstverständlich auch f und φ korrespondierende (identische) Punkte der Maculae centrales retinarum. Nach allen klinischen Erfahrungen geht die Faser a nach dem linken subkortikalen Optikusganglion, vom korrespondierenden α kommt eine gekreuzte Faser herüber und inseriert sich dicht neben a, ein gleichzeitig von α und a hier ankommender Doppelreiz wird als ein einziger kortikal wahrgenommen („binokular einfach gesehen"). Wird F binokular fixiert, so bildet es sich im im LA in f, im RA in φ in jeder Hirnrinde in fφ ab. Ein etwas diesseits von F gelegener Punkt x würde sich im LA z. B. in b, im RA in γ, in der Cortex jederseits nach der Formel b f φ γ abbilden. Ein etwas jenseits von F gelegener Punkt y würde sich im LA in c, im RA in β, in der Cortex jederseits nach der Formel β f φ c abbilden. Entfernt sich x weiter vom F, so wird die Abbildung a f φ δ stattfinden, entfernt sich y weiter, so würde αf φ d zu lesen sein. Obwohl also a und α, d und δ korrespondierende (oder identische) Punkte darstellen, ist es doch durchaus nicht gleichgültig, ob dieser oder jener gereizt wird, denn die Formel a f φ δ gibt eindeutig eine Wahrnehmung größerer Nähe, α f φ d eine solche größerer Ferne.

Bedenkt man, daß in der Retina b, β, c und γ nur Bruchteile eines μ von f oder φ entfernt zu sein brauchen, so ergibt sich die Notwendigkeit einer außerordentlich feinen Projektion der Macula retinae in jeder Hirnhälfte, was sich nur durch eine genaue Lokalisation des Sehzentrums (kaum aber im Sinne Monakows, der ein vikariierendes Eintreten der verschiedenen Hirnteile zum Ersatz für eine geschädigte Stelle des optischen Feldes annimmt) erklären dürfte.

Die binokulare Tw. oder das stereoskopische Sehen beruht also auf Inkongruenz der beiden Netzhautbilder, welche von einem dreidimensionalen Objekt entworfen worden. Für einen und denselben Gegenstand ist die Abweichung seiner beiden Bilder von der Kongruenz um so geringer, je weiter der Gegenstand vom Gesicht entfernt ist, je mehr er sich der Unendlichkeit nähert. Hieraus erklärt sich die bekannte Tatsache, daß für beide Augen die Tiefendimensionen der Außendinge im allgemeinen um so weniger hervortreten, das Relief derselben sich um so mehr verflacht, je entfernter sie sind.

Andererseits ist es denkbar, daß uns ein Körper plastischer erscheint als er ist, wenn wir ihn aus zu großer Nähe betrachten.

Wollen wir diese Frage experimentell untersuchen, so müssen wir möglichst alle empirischen Momente ausschalten und im doppelten Dunkelzimmer mit möglichst einfachen stereoskopischen Körpern, deren Dimensionen variabel sind, unsere Untersuchungen machen.

So kann man z. B. 3 Stricknadeln so aufstellen, daß sie in ihrer Gruppierung ein gleichseitiges vertikales Prisma darstellen, das eine seiner Kanten dem Beobachter symmetrisch zuwendet. Die Basis des Prismas — d. h. die durch die abgewandten Prismenkanten (Nadeln) gelegte Ebene — repräsentiert sich dem Beobachter durch einen Winkelwert, dessen Betrag wir konstant machen können, wenn wir den Abstand beider Stäbe für doppelte Entfernung verdoppeln usw. Ebenso repräsentiert sich die Höhe (körperliche Tiefe oder Plastik) des Prismas, d. h. der Abstand der dem Beschauer zugewendeten Prismenkante (des vorderen Stabes) von der Prismenbasis als ein Winkel, den wir ebenfalls — wenn auch auf wesentlich kompliziertere Weise — konstant machen können, indem wir bedenken, daß die diesem Winkel entsprechende lineare Strecke A F ähnlich wie die Tangente wächst, s. Figur 2.

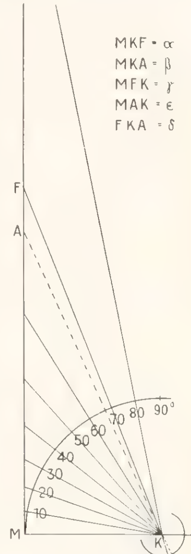


Fig. 2.

Die Experimente ergaben nun folgendes: Stellt man die Stäbe so ein, daß sie in der Wirklichkeit ein gleichseitiges Prisma darstellen, so ergibt sich als Verhältnis des Breitenwertes der Basis (in Graden) zum Querdisparationswert der Prismenhöhe (körperliche Tiefe = Plastik) für die Entfernung

von $^1/_3$ m = 5,8:1
$^1/_2$ m = 8,8:1
1 m = 17,0:1
2 m = 34,4:1

Wurden jedoch die Zahlen für die Höhe (körperliche Tiefe) des Prismas eingestellt, welche verlangt wurden, damit dem Beobachter das Prisma gleichseitig erschien (und

nicht zu flach), so war das Verhältnis für die Entfernung von

1/3 m	=	5,8:1
½ m	=	6,5:1
1 m	=	10,5:1
2 m	=	16,6:1

Dazu steht in einem direkten — geradezu zahlenmäßig genauen — Verhältnis die Tatsache, daß in obigen Versuchen die absolute Entfernung (der Stäbchenkombination) von dem Beobachter gewöhnlich um etwa die Hälfte unterschätzt wurde, wenn es sich um größere Entfernungen handelte, und daß sie um so richtiger taxiert wurde, je genauer sie 1/3 m betrug. Dazu stimmt also recht gut, daß in dieser Entfernung die Plastik eines Gegenstandes am richtigsten beurteilt wurde, daß bei größerer Entfernung die seiner Plastik entsprechenden Querdisparationen der Netzhautbilder um so gründlicher und richtiger ausgenutzt wurden, je richtiger die absolute Entfernung geschätzt wurde, und daß sie um so weniger ausgenutzt wurden, also eine um so höhere (übertriebene) Einstellung der Prismenvorderkante verlangt wurde, je mehr die absolute Entfernung unterschätzt wurde.

Die Bewertung der seitlichen stereoskopischen Bilddifferenzen (die Ausnützung der Querdisparation) ist also abhängig von der Vorstellung der absoluten Entfernung, in die wir einen Gegenstand zu verlegen haben. Da letzteres erheblich von Erfahrungsmomenten abhängt, so ergibt sich eine rechte Kompliziertheit des Problems. Selbst wenn wir einen Gegenstand immer dahin lokalisierten, wohin unsere Sehachsen konvergieren, wäre die Schwierigkeit die, zu wissen, wohin unsere Augen sehen, denn Muskelgefühle kennen wir an den Augenmuskeln nicht. Aber auch wenn wir wüßten, daß unsere Augenachsen parallel ständen, so würden wir doch das binokular gesehene Bild nicht in die Unendlichkeit, bei leichter Divergenz nicht hinter unseren Kopf, sondern immer nach irgendwelchen Erfahrungsmotiven lokalisieren, wo diese aber fehlen, wie im wissenschaftlichen Versuch, da werden wir uns in der Regel für Objekte relativ geringen Umfangs eine Entfernung von 1/3 bis ½ m vorstellen, nämlich diejenige, in der wir am meisten gewohnt sind, ein Ding sozusagen in die Hand zu nehmen, um seine Plastik zu beurteilen. Diese Entfernung von 1/3 bis ½ m hat man deshalb die Breite des orthoskopischen oder orthostereoskopischen Sehens genannt.

4. Orthostereophotographie. Auch auf andere, sozusagen objektivere Art läßt sich das Problem der Orthostereoskopie untersuchen, nämlich durch das photographische Experiment.

Nehmen wir z. B. ein gleichseitiges Prisma stereophotographisch auf, so empfiehlt sich zunächst folgender einfache Weg: Eine optische Bank von 75 cm Länge machen wir an ihrem einen Ende um eine vertikale Achse drehbar, über dieser Achse wird das zu photographierende Prisma vertikal so aufgestellt, daß sich die dem Objektiv zugewendete Vorderkante auf der Mattscheibe zunächst möglichst in der Mitte zwischen den beiden ferneren Kanten abbildet, die drei Kanten werden nun möglichst gleich scharf eingestellt, die optische Bank um 5½ nach rechts und um ebensoviel nach links gedreht und in jeder Stellung bei engster Blende die Aufnahme gemacht. In diesem Falle befindet sich das Prisma in der doppelten Brennweite (34 cm), also in Leseweite, die Lateralverschiebung des Objektivs beträgt bei einer Konvergenz von 11° etwa 65 mm, ist also gleich der mittleren Pupillendistanz. Wollen wir die so gewonnenen Bilder zu einem dem Original entsprechenden Sammelbild vereinigen, so betrachten wir sie in einem Spiegelstereoskop mit veränderlicher Konvergenzstellung, am besten in einem Haploskop, in dem die Spiegel durch die Hypotenusenflächen rechtwinkliger Prismen ersetzt sind. Die Bilder — rechtes und linkes der Spiegelung wegen vertauscht — befinden sich in 34 cm Entfernung; bei einer Konvergenz von 11° sehen wir jetzt in Leseweite vor uns eine prismatische Figur, welche wir mit dem dort postierten Originalprisma zur Deckung bringen, also sehr bequem vergleichen können. Die Plastik des Sammelbildes entspricht der des Originals völlig.

Machen wir die zwei Aufnahmen bei einer Konvergenz von 9°, was einer Pupillendistanz von ca. 50 mm entspricht, so zeigen die Bilder deutlich zu geringe Plastik; photographieren wir mit 13½° Konvergenz (Pupillendistanz = 80 mm), so erscheint das Bild c. p. überplastisch.

Schieben wir jetzt die Haploskoparme zurück, vermindern wir dadurch die Convergenz, so erscheint das Prisma in toto etwas vergrößert, etwas weiter entfernt und deutlich stärker plastisch als vorher. Nehmen wir nun eine stärkere Konvergenz (durch Vorschieben der Haploskoparme), so wird es in toto kleiner, kommt näher und nimmt an Plastik ab. Ein mit zu geringer Lateraldistanz aufgenommenes Stereoskopbild kann also doch den richtigen körperlichen Eindruck machen, wenn wir die in beiden Halbbildern enthaltenen gegensätzlichen Breitendifferenzen („Qd.") besser ausnutzen. Letzteres erreichen wir durch die Vorstellung einer relativ zu großen Entfernung, wie sie uns z. B. im Prismenstereoskop gegeben wird. Praktisch mag es demnach richtig sein, mit

verringerter Pupillendistanz (45 bis50 mm) zu photographieren und die Bilder im Prismenstereoskop zu betrachten, exakt kann es nur sein, wenn man die zwei Aufnahmen unter einem Konvergenzwinkel von ca. 11° macht und die Bilder in der oben angegebenen Weise vereinigt.

Ueberhaupt sollten wir nicht von „seitlicher Objektivverschiebung" und Pupillendistanz, sondern mehr von Konvergenzwinkel reden: manche Unklarheiten in der sterophotographischen Literatur erledigen sich dadurch von selbst. Wenn z. B. gesagt wird, bei Aufnahmen in natürlicher Größe sei die Lateralverschiebung der Objektive abhängig von der Brennweite derselben (je kleiner die Brennweite, um so geringer sei die Lateralverschiebung), so ist das gewiß richtig, weit einfacher aber erscheint es mir, zu sagen, die Winkel der beiden Aufnahmeobjektivachsen seien konstant 11°. Damit fällt ja auch die optische Vorzeichnung weg, welche stattfinden muß bei Parallelstellung der Objektivachsen, zumal bei Naheaufnahmen.

Durch eine Reihe verschiedener Aufnahmen habe ich diesen letzteren Punkt (Konstanz des Konvergenzwinkels) noch experimentell erhärtet und für Vergrößerungen zwischen 1- und 8 fach gefunden, daß es einzig auf den Konvergenzwinkel ankommt. Auch für stärker vergrößernde Stereoskopaufnahmen ist die Richtigkeit dieser Regel zum mindesten sehr wahrscheinlich. Doch tut man in solchen Fällen wahrscheinlich besser, das Objekt auf seinem drehbaren Objekttisch um 5½° nach jeder Seite aus seiner Frontalstellung zu drehen. Bei Aufnahmen mit Oelimmersion kann man statt dessen die Beleuchtung durch seitliche Verschiebung des Abbeschen Kondensors bewirken und diesen erst 5½° links, dann 5½° rechts aus seiner Mittellage entfernen, also mit Strahlenbündeln photographieren, die eine Konvergenz von 11° haben. Auf diese Weise sind stereophotographische Aufnahmen von Mitosen und ähnlichem zu erzielen.

Bei verkleinernden Aufnahmen liegen die Verhältnisse etwas komplizierter. Verkleinerungen bis zu $^1/_8$ habe ich mehrfach ausgeführt und wie oben die Richtigkeit des konstanten Winkels bewiesen. Die oben für Mikrostereophotographie aufgestellte Forderung des konstanten Konvergenzwinkels von 11° läßt sich demnach für verkleinernde Aufnahmen für den Fall erweitern, daß die Wiedervereinigung des Halbbildes unter einer Konvergenz von 11° in Leseweite erfolgt; für die wissenschaftliche Photographie ist dies wohl zu beachten.

Diese Forderung ist indes, wie wir sogleich sehen werden, durchaus nicht schematisch zu verallgemeinern, denn einen Berg oder einen Baum u. ä. können wir uns nicht in 34 cm Entfernung vorstellen. Die Bilder solcher Dinge verlegen wir — unabhängig vom jeweiligen Konvergenzgrad unserer Augen — in eine weit größere, zum Teil wohl in ihre wirkliche Entfernung. Haben wir eine solche Doppelaufnahme nun unter einem Winkel von 11° gemacht, so haben wir Bilddifferenzen, wie wir sie bei so weit entferntem Objekt nie zu sehen gewöhnt sind. Diese übergroßen Querdisparationen werden nun, entsprechend der Vorstellung großer Entfernung des Objektes, sehr stark bewertet, d. h. als sehr große Entfernungsdifferenzen gedeutet, und so resultiert ein bedeutender Uebereffekt, eine Ueberplastik: eine Landschaft kommt uns vor wie ein kleines Modell derselben, wir selbst dünken uns dagegen Riesen zu sein.

Photographieren wir dagegen dieselbe Landschaft mit Pupillendistanz 60 bis 70 mm (wobei die Objektivachsen getrost parallel stehen können, da der Konvergenzwinkel doch zu klein ist), so erscheint uns das Sammelbild zunächst fast in einer Ebene zu liegen. Je weiter wir es dann aber in unserer Vorstellung hinausrücken, um so mehr vertieft sich das Bild; und verlegen wir es in die wirkliche Entfernung, so erscheinen uns auch die Entfernungsdifferenzen im Bilde etwa ebenso groß wie die der Wirklichkeit.

Den meisten Menschen gelingt die Projektion eines Bildes in große Entfernung leichter, wenn das Bild transparent ist: so erklärt sich zum Teil wenigstens die größere Plastik stereophotographischer Transparente, da mit der Projektion in größere Entfernung eine bessere Ausnutzung der Bilddifferenzen Hand in Hand geht.

Wollen wir also uns ein Urteil über die Plastik einer Gebirgsgegend bilden, so können wir sie sehr wohl — wo dies technisch möglich ist — unter einem Konvergenzwinkel von 11° photographisch aufnehmen, die Bilder im Spiegelstereoskop in 34 cm vereinigen; wir sehen dann ein in allen Dimensionen richtig verkleinertes Modell; so besitze ich Aufnahmen der Cheopspyramide, welche uns als wirklich rechtwinklige Pyramide erscheint, nicht aber den imposanten Eindruck macht, der diesem Bauwerk nachgerühmt wird; einen möglichst naturgemäßen Eindruck erreichen wir auf ganz andere — oben angegebene — Weise.

Die letzte Konsequenz in dieser Richtung zog v. Rohr durch die Konstruktion seines Doppelveranten.

Indem er von der Voraussetzung ausging, daß die Bilddifferenzen von Fernaufnahmen außerordentlich geringe sind, nahm er zwei identische Bilder und betrachtete diese durch eine Doppellinse, die derart konstruiert

ist, daß sie möglichst ausgiebige Blickbewegungen gestattet, ohne daß astigmatische Verzeichnung auftritt; der Knotenpunkt solcher „Verant"linsen fällt mit dem Augendrehpunkt zusammen. Bei Betrachtung zweier Bilder im Doppelveranten sind also nur parallele Augenbewegungen, keine Konvergenzen möglich; Bilder, die unter 11° Konvergenz aufgenommen sind, kann man also in Doppelveranten nicht betrachten.

5. **Stereoskopische Messung.** Alles das Subjektive, welches den oben geschilderten Methoden immer noch zweifellos anhaftet, indem wir z. B. trotz einer Konvergenz der Sehachsen von 11° doch keineswegs gezwungen sind, eine Entfernungsvorstellung von 33 cm festzuhalten, legten den Wunsch nach, stereoskopische Messungsmethoden zu haben.

Theoretisch sehe ich drei Wege, die indes sehr verschieden weit zu führen scheinen.

1. Die stereoskopische Berechnung. Zunächst könnte man versuchen, die oft erwähnten seitlichen Bilddifferenzen auszumessen und unter Berücksichtigung der Aufnahmebedingungen die Plastik zu berechnen.

Auf die Einzelheiten der Berechnung soll hier nicht näher eingegangen werden, nur folgendes sei bemerkt: bei einer derartigen Berechnung der Tiefenwerte eines stereoskopische Sammelbildes, dessen Halbbilder mit 20 cm-Objektiven bei Pupillendistanz = 64 und 100 cm Entfernung gewonnen wurden, bedingte ein Messungsfehler von 0,1 mm einen Berechnungsfehler von 14 mm Entfernungsdifferenz, ein Messungsfehler von 0,25 mm einen Berechnungsfehler von fast 35 mm. War der aufzunehmende Gegenstand nicht 100, sondern 200 cm entfernt, so entsprechen denselben Messungsfehlern von 0,1 oder 0,25 mm schon Strecken (Berechnungsfehler) von 60 oder 150 mm.

Für Gegenstände, die aus geringerer Entfernung aufgenommen wurden, sind die Fehler wohl kleiner und wenn wir die Ausmessung der Bilder mittels Mikroskop und Okularmikrometers machen können, ist noch eine größere Genauigkeit zu erzielen, immerhin leuchtet ein, daß wir auf diesem Wege kaum zu exakten Resultaten kommen werden. Vollends versagt die Methode dann, wenn wir keinen markanten Punkt oder Linien zur Abmessung benutzen können, sondern wenn es sich um Flächen handelt, die allmählich ineinander übergehen.

2. Die stereoskopische Rekonstruktion. Diese Methode besteht darin, daß wir die stereoskopischen Halbbilder in Form von (flauen = unterexponierten) Diapositiven in die richtige Entfernung mit richtigem Seitenabstand vor unsere Augen bringen und nun stereoskopisch visierend das Objekt in der Außenwelt „rekonstruieren".

Die Methode ist etwas kompliziert, setzt die Kenntnis gewisser Aufnahmebedingungen voraus, ergibt aber — richtig verwendet — sehr genaue Resultate.

3. Die stereoskopische Messung mittels Skala und wandernder Marke. Die hierfür konstruierten Instrumente dienen zunächst zur binokularen Ausmessung der Tiefenverhältnisse in der Wirklichkeit, z. B. in einer Gegend. Zwei Fernrohre entwerfen je ein stereoskopisches Halbbild in ihrer Brennebene. In dieser letzteren befinden sich die Halbbilder einer berechneten Skala, die, binokular verschmolzen, den Eindruck einer in die Tiefe verlaufenden Markenreihe macht. Gleichzeitig mit dem Sammelbild der Wirklichkeit sehen wir also im Fernrohr eine Markenreihe, welche wie Meilensteine die Entfernungen abzulesen gestattet.

Vorausgesetzt, daß die geringsten mit der Skala abzulesenden Entfernungen in bezug auf die Objektivbrennweite gleich unendlich anzusehen sind, sich also — etwa — in der Brennweite abbilden, kommt man mit einer einzigen leicht zu berechnenden, in dieser Brennebene aufzustellenden Skala aus. In nuce gelöst ist dieses Problem schon von Mach im Jahre 1866 (Sitz.-Ber. der k. k. Akad., Math. nat. Kl., Bd. LIV Abt. 2).

Handelt es sich aber nicht um die Ausmessung der Wirklichkeit, sondern um die aufgeklebter Halbbilder, so kompliziert sich die Sache insofern, als wir hier nicht mit einer allgemeingültigen Skala auskommen. Da für solche Verhältnisse in der Formel $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ a relativ kleine Werte hat, d. h. die Stereophotogramme aus geringeren Entfernungen aufgenommen werden, so fällt b und f nicht zusammen, d. h. die Bilder entstehen nicht in der Brennebene, sondern für jedes Bild haben wir eine andere Balglänge zu berücksichtigen und entsprechend brauchen wir andere Tiefenwerte in der Skala.

Andererseits vereinfacht sich die Messung dadurch, daß wir dann auf jedes Stereoskopbild die beiden Halbskalen, welche zu ihm der Balglänge nach passen, ohne weiteren Apparat einfach darauflegen können. Diese einfache Methode ist anwendbar auf Aufnahmen aus $^1/_3$ bis allenfalls 2 m Entfernung.

In ein mattschwarz gestrichenes Brettchen (Korkscheibe) stecken wir feine Insektennadeln senkrecht ein in der Weise, wie es Figur 3 zeigt: in eine Frontlinie 2,5 cm voneinander entfernt zwei Nadeln, von der rechten der beiden an, in eine schräge Linie nach links vorn fünf weitere, die sagittal gemessen, 1 bis

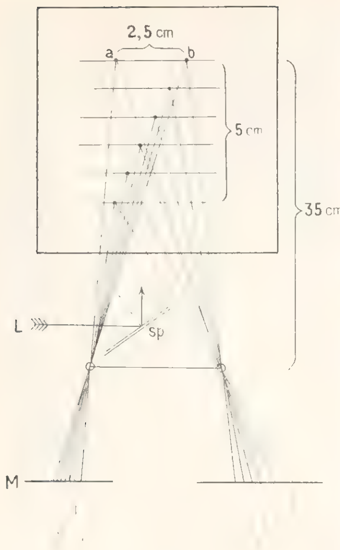


Fig. 3.

5 cm vor der Ebene der beiden oberen stehen, wenn das Brettchen horizontal liegt. Mit Hilfe zweier nebeneinander stehender Objektive, deren optische Achsen horizontal und parallel gerichtet sind, bilden sich diese Nadeln auf der rechten und linken Hälfte der Mattscheibe mit gewissen Differenzen ab, wie die Figur 3 erkennen läßt. Neigen wir nun das den Objektiven zunächst liegende Ende des Brettchens etwas, so erfolgt die Abbildung in der unter der Mattscheibe skizzierten Weise. Diese beiden Halbbilder, stereoskopisch verschmolzen, vermitteln uns den Eindruck einer von links nach rechts hinten in die Ferne verlaufenden Meßskala, in der je zwei Marken, sagittal gemessen 1 cm voneinander stehen.

Hat man diese Markenreihe im Dunkelzimmer bei einer Beleuchtung photographiert, wie sie Figur 3 angibt, so erhält man direkt als Negative zwei schwarze Markenreihen auf unbelichtetem Grunde, die — mit dem Diamanten in der Mitte der Platte voneinander getrennt — als Meßskala benutzt werden können (Fig. 4): man legt sie horizontal nebeneinander jede auf ihr stereoskopisches Halbbild, bringt durch seitliche Verschiebung die fernsten Marken mit den fernsten Punkten des Stereoskopbildes in eine Frontalebene und liest ab, mit welcher Marke ein Punkt in einer frontalen Ebene liegt, dessen Entfernungsdifferenz vom fernsten wir zu wissen wünschen. War das Objekt unter denselben Bedingungen wie die Skala photographiert, so ergab sich eine sehr hohe Genauigkeit.

Weitere solcher Skalen gültig für Aufnahmen in 40, 50, 60 und 75 cm Entfernung habe ich im Gr. Arch. f. Ophth. LV Heft 2, 299 abgebildet. Desgleichen eine solche von 0,5 bis 2 m. Die 35 cm-Skala ist nun, zumal wenn wir sie mit 11° Konvergenz aufnehmen — indem die Projektion auf der Mattscheibe dann senkrecht erfolgt —, anwendbar auf

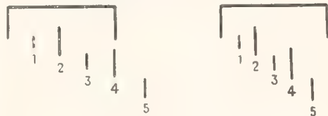


Fig. 4.

alle Mikrostereophotogramme, die unter demselben Konvergenzwinkel gemacht werden. Beträgt die mikroskopische Vergrößerung 10, so entspricht ein Teilstrich der Skala dann (nicht 1 cm, sondern) 1 mm Objektgröße, ist die Vergrößerung gleich 100, so entspricht ein Teilstrich 0,1 mm.

Das Prinzip der wandernden Marke endlich ist folgendes: Bringen wir vor jedem Auge eine Marke an, deren Abstand voneinander der Pupillendistanz gleich ist, so müssen sich beide Gesichtslinien parallel stellen, um die mittleren Doppelbilder zu verschmelzen: das Sammelbild liegt dann in unendlicher Ferne. Bewegt man nun eine Marke in der Richtung auf die andere zu, so werden sich die Gesichtslinien in der Endlichkeit kreuzen. Je nach der Annäherung der Marken aneinander und je nach ihrem Abstand von den Drehpunkten der Augen, werden sich diese letzteren auf eine ganz bestimmte Entfernung einstellen. In dieser Entfernung scheint uns dann das Sammelbild der binokular einfach gesehenen (sagittal) wandernden Marke zu stehen. Eine sehr sorgfältig auszuarbeitende Mikrometerskala gestattet, die Entfernung direkt in Metern abzulesen. Diese wandernde Marke läßt sich nun auch statt der oben beschriebenen Markenskala in ein telestereoskopisches Prismenfernrohr einsetzen und hat demgegenüber gewisse Vorteile.

6. Stereoapparate. Das Prinzip, durch Vergrößerung der Pupillendistanz zweier Fernrohre einen vergrößerten plastischen Effekt zu erzielen, ist schon von Helmholtz aufgestellt, praktisch gelöst ist die Frage erst durch die aus den Zeißschen Werkstätten stammenden Ar-

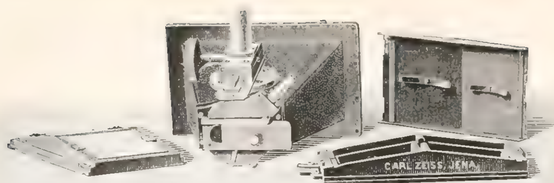


Fig. 5a.



Fig. 6.

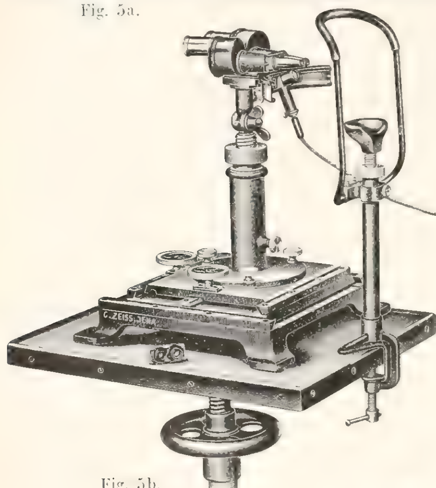


Fig. 5b.

Fig. 5a und b. Binokularmikroskop von Csapski-Drüner.

Fig. 6. Stereoskopischer Entfernungsmesser.

Fig. 7. Porroscher Strahlengang.

Fig. 8. Stereokomparator.



Fig. 7.

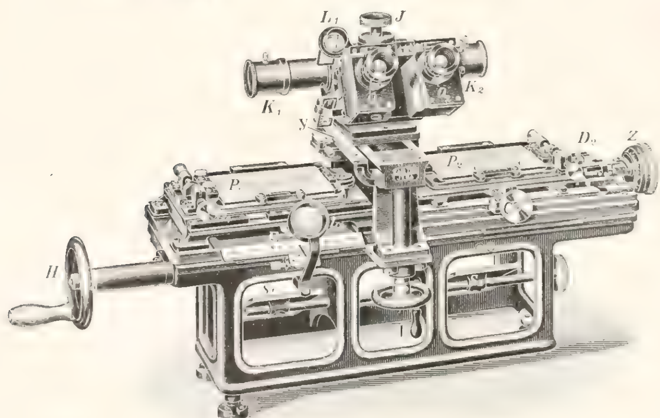


Fig. 8.

beiten, besonders **Pulfrichs**, dessen Erfindergeist wir die **Triëderbinokels**, **telestereoskopischen Fernrohre und Entfernungsmesser** (Fig. 6) verdanken. Der gleichen Firma verdanken wir das beste **binokulare Mikroskop** (Fig. 5) mit aufrechtem Bild, das in keinem modernen wissenschaftlichen oder klinischen Untersuchungsraum fehlen dürfte. Durch die **Porro**sche Prismenkombination (Fig. 7) wird die Pupillendistanz regulierbar gemacht, wird das umgekehrte Mikroskopbild durch vierfache Spiegelung aufgerichtet und wird die Rohrlänge auf etwa $^1/_3$ der sonst notwendigen beschränkt, was den ganzen Apparat außerordentlich handlich macht und das Gesichtsfeld stark erweitert. Leider ist es bisher noch nicht gelungen das Binokularmikroskop mit entsprechender Meßskala oder Wandermarke auszustatten, wodurch es noch wesentlich gewinnen würde.

Einen sehr komplizierten Apparat, welcher die Prinzipien der stereoskopischen Berechnung und Rekonstruktion, sowie die der Telestereophotographie und des Mikroskops mit Wandermarke vereinigt, hat **Pulfrich** in seinem **Stereokomparator** konstruiert (Fig. 8). Mit seiner Hilfe kann man z. B. die Tiefe des Mondkraters, die Entfernung der Sterne voneinander und ähnliches stereographisch messen. Ein Gebirge kann man damit aufnehmen und danach ein plastisch richtiges Modell rekonstruieren.

Die Unmenge der Apparate zu nennen, die das Prinzip der Stereoskopie verwerten, ist im Rahmen dieser Abhandlung unmöglich. Es sei deshalb nur noch auf einige Anwendungen hingewiesen, die ein gewisses praktisches Interesse beanspruchen können. Das ist zunächst die **stereoskopische Projektion**. Hier sei von den verschiedensten Methoden nur die der **Rotgründrucke** erwähnt. Das dem linken Auge entsprechende stereoskopische Halbbild reproduziert man z. B. in Rotdruck, das dem rechten entsprechende druckt man in Grün auf dieselbe Stelle des Papiers (siehe „**Plastische Weltbilder“ des Handels**), bewaffnet man nun seine Augen durch eine Brille, die vor das linke Auge ein grünes, vor das rechte ein rotes Glas bringt, so wird für das letztere das rote Bild ausgelöscht, während ihm das grüne Bild schwarz erscheint, vice versa für das andere Auge. Man bekommt, wenn die Farben des Druckes und der Brille gut stimmen (diese sind en gros käuflich und werden aus gefärbter Gelatine hergestellt), einen vorzüglichen körperlichen Eindruck. Projiziert man solche Bilder episkopisch oder entsprechende Rotgründiapositive diaskopisch, so kann man einem großen Auditorium stereoskopische Bilder zeigen, wenn nur jeder eine Rotgrünbrille hat. Je nach der Vollkommenheit des binokularen Sehaktes wird der Effekt sein.

Gleichfalls schon von **Mach** in den 60er Jahren im Prinzip gelöst ist das Problem der **stereoskopischen sukzessiven Doppelaufnahmen** auf dieselbe photographische Platte.

Photographierte er z. B. stereoskopisch einen Würfel und dann auf dieselbe Platte eine Kugel, welche er an Stelle des Würfels legte — jede Aufnahme mit halber Expositionsdauer —, so sah er im Stereoskopbild eine Kugel in einem (durchsichtigen) Würfel, wenn letzterer größer war. Ohne diese Arbeit zu kennen, habe ich ca. 30 Jahre später eine Methode zur Lagebestimmung sich deckender Organe durch sukzessive stereographische Aufnahme auf dieselbe Platte angegeben (**Neißers** Atlas). In einem durchsichtig erscheinenden Kopf sieht man — anatomisch richtig gelagert — das Hirn und kann dessen Verhältnis zu den bedeckenden Teilen studieren, messen usw.

Es steht dem nichts im Wege, die Aufnahmen auf eine Platte zu häufen und z. B. äußere Haut, Knochengerüst und innere Organe oder das Kind im Mutterleib für Unterrichtszwecke zur stereographischen Darstellung zu bringen. Auch „Durchschnittsbilder“ einer Altersklasse, einer Rasse usw. hat man auf diese Weise zu erzielen gesucht; doch wird damit ja allerdings ein anderer Zweck verfolgt.

Literatur. **v. Liebermann** *(Physiolog. Inst. Freiburg i. Br.), Beitrag zur Lehre der binokularen Tiefenlokalisation. Zeitschr. f. Physiol. der Sinnesorgane 44, S. 428 bis 443.* — **v. Karpinska**, *Experimentelle Beiträge zur Analyse der Tiefenwahrnehmung (Psycholog. Inst. Zürich). Zeitschr. für Psychol. 57, S. 1 bis 88.* — **Bjerke**, *Diploskop. Heidelberger Bericht 1910, S. 346* — **v. Kries**, *Ueber das Binokularsehen exzentrischer Netzhautteile. Zeitschr. f. Physiol. der Sinnesorgane 44, S. 165 bis 181.* — **Krusius**, *Ueber einäugig und zweiäugig erzeugte Tiefeneindrücke. Arch. f. A. 62, S. 340 bis 344.* — **Bishop**, *Eine neue Probe des Binokularsehens. Kl. Monatsbl. f. A. 8, S. 215.* — **Yoshimura**, *Ueber die Beziehungen des Balkens zum Sehakt. Arch. f. ges. Physiol. 129, S. 425 bis 460.* — **Seggel**, *Ueber Entfernungsschätzen usw. Kl. Monatsbl. f. A. 6, S. 102 bis 120.* — **van Valkenburg**, *Zur Kenntnis der gestörten Tiefenwahrnehmung. D. Ztschr. f. Naturhk. 34, S. 322 bis 337; 35, S. 472 bis 475.* — **Krusius**, *Ueber die absolute Tridimensionalität unokularer Gesichteindrücke. Kl. Monatsbl. f. A. 6, S. 470 bis 471.* — **Stolze**, *Die Stereoskopie und das Stereoskop in Theorie und Praxis. Enzyklopädie der Photographie, Heft 10.* — **v. Rohr**, *Abh. zur Geschichte des Stereoskops. **Ostwalds** Klassiker, Nr. 168. Leipzig 1908.* — **Derselbe**, *Das Sehen. S.-A. aus dem Handbuch der Physik, II. Aufl., Bd. 6, S. 270 bis 295, 1904.* — **Derselbe**, *Ueber Einrichtungen zur subj. Demonstration der verschiedenen Fälle der durch das beidäugige Sehen vermittelten*

Raumanschauung. Zeitschr. f. Sinnesphysiol., Bd. 41, S. 408 bis 429, 1907. — **Derselbe,** *Die binokularen Instrumente, 223 S. Lit. Berlin 1907.* — **Heine,** *Sehschärfe und Tiefenwahrnehmung. Gr. A. f. Ophth. 51, Heft 1, 1900.* — **Derselbe,** *Orthoskopie Gr. A. f. Ophth. 51, Heft 3, 1900.* — **Derselbe,** *Orthostereoskopie. Gr. A. f. Ophth. 53, Heft 2, 1901.* — **Derselbe,** *Stereoskopische Messung. Gr. A. f. Ophth. 55, Heft 2, 1903.* — **Derselbe,** *Körperlichsehen im Spiegelstereoskop und im Doppelveranten. Kl. Monatsbl. f. A. 43, S. 1 bis 8, 1905.* — **Derselbe,** *Ueber die Bedeutung der Längenwerte für das Körperlichsehen. Heidelb. Berichte, 31. Versammlung, S. 179 bis 199.* — **Derselbe,** *Ueber die richtige Plastik im Stereophotogramm. Zeitschr. f. wiss. Photographie II, Heft 2 und 3, 1904.* — **Derselbe,** *Beiträge zur vergleichenden und entwickelungsgeschichtlichen Hirntopographie, zugleich eine stereophotographische Methode zur Lagebestimmung sich deckender Organe durch sukzessive Aufnahme auf dieselbe Platte. Neissers Atlas 46, 1902.*

L. Heine.

Stevin (Stephanus)

Simon.

Geboren 1548 in Brügge, gestorben 1620 im Haag oder Leyden. Er war Buchhalter in Antwerpen, dann Steuerverwalter in Brügge, unternahm darauf Reisen durch Preußen, Polen, Norwegen, lebte später in Leyden, zuletzt als Generalquartiermeister der holländischen Armee und Oberaufseher der Land- und Wasserbauwerke in Holland. Er hat zahlreiche Versuche auf dem Gebiet der Mechanik veröffentlicht, über den Boden- und Seitendruck von Flüssigkeiten, über kommunizierende Röhren; eine 1589 herausgegebene Abhandlung enthält eine Andeutung des Satzes vom Parallelogramm der Kräfte, für gewisse Fälle stellte er das Prinzip der virtuellen Verrückungen auf.

Literatur. Goethals, *Notice historique sur la vie et les ouvrages de S. S., Bruxelles 1841.* — **Steichen,** *Vie et travaux de S. S., Bruxelles 1846.*

E. Drude.

Stickstoffgruppe.

a) Stickstoff. b) Phosphor. Arsen. Antimon. c) Wismut. Vanadium. Niob. Tantal.

a) Stickstoff.

Atomgewicht 14,01.

1. Vorkommen. 2. Geschichte. 3. Darstellung. 4. Eigenschaften. 5. Analytische Chemie. 6. Spezielle Chemie. 7. Thermochemie. 8. Photochemie.

1. Vorkommen. Ungebundener Stickstoff kommt in großen Mengen in der atmosphärischen Luft vor, die etwa 78 Volumprozente Stickstoff enthält. In geringer Menge findet er sich in den Gasen vieler Quellen, meistens vermischt mit Argon und Helium, und in Gesteinseinschlüssen.

In Verbindung mit anderen Elementen kommt er auf der Erde in großer Menge als wesentlicher Bestandteil pflanzlicher und tierischer Organismen und in geringerer Menge in Form anorganischer Salze (Nitrate, Ammonsalze) vor.

2. Geschichte. Bis zum 17. Jahrhundert wurde die Luft für einen einfachen Körper gehalten. Um die Mitte des 17. Jahrhunderts werden zuerst Ansichten laut, welche die Luft als ein Gemenge verschiedener Bestandteile erscheinen lassen, aber erst gegen Ende des 18. Jahrhunderts zeigt Rutherford, daß die Luft einen besonderen Bestandteil enthält, welcher zur Unterhaltung der Atmung und Verbrennung untauglich ist. Im Anfang des 19. Jahrhunderts wurde die elementare Natur des gasförmigen Stickstoffs endgültig festgestellt und im Jahre 1894 bewiesen Lord Rayleigh und Ramsay, daß der aus Luft hergestellte Stickstoff geringe Mengen der sogenannten Edelgase (Argon, Neon usw.) enthält.

Von den Verbindungen des Stickstoffs sind am längsten bekannt der Salpeter und der Salmiak. Die Darstellung der Salpetersäure wurde wohl zuerst von Geber im 8. Jahrhundert beschrieben, während über das freie Ammoniak die ersten Beobachtungen im 17. Jahrhundert gemacht wurden. Die Ermittelung der Zusammensetzung dieser Verbindungen und ihre Beziehung zum atmosphärischen Stickstoff erfolgte gegen Ende des 18. Jahrhunderts. Im Jahre 1784 entdeckte Cavendish die Bildung des Stickoxyds und der Salpetersäure aus Stickstoff und Sauerstoff unter der Einwirkung elektrischer Funken und 1786 veröffentlichte Lavoisier seine Untersuchungen über die quantitative Zusammensetzung der Salpetersäure. Zur selben Zeit bestimmte Berthollet die Bestandteile des Ammoniaks qualitativ und quantitativ. Im 19. Jahrhundert wurden außerordentlich viele organische Stickstoffverbindungen dargestellt und ihre Beziehungen zueinander ermittelt und gegen Ende des 19. Jahrhunderts gelang es Curtius und Lossen, einige einfache anorganische Stickstoffverbindungen (Azoimid, Hydrazin, Hydroxylamin) herzustellen, deren organische Derivate schon länger bekannt waren.

3. Darstellung. a) Aus der Luft. b) Aus Verbindungen.

3a) Entzieht man der Luft den Sauerstoff, die Kohlensäure und den Wasserdampf,

so erhält man Stickstoff, welcher mit etwa 1% Argon und anderen Edelgasen verunreinigt ist. Die Entfernung der inerten Gase ist auf chemischem Wege nicht zu erreichen. Zur Absorption des Sauerstoffs wird eine alkalische Pyrogallollösung oder besser eine alkalische Lösung von Natriumhydrosulfit ($Na_2S_2O_4$) benutzt (vgl. den Artikel „Chemische Gasanalyse"). Auch durch Ueberleiten von Luft und Wasserstoff über blankes Kupfer und Kupferoxyd erhält man Stickstoff. Zur Entfernung der Kohlensäure und des Wassers leitet man das vom Sauerstoff befreite Gas durch Kalilauge und konzentrierte Schwefelsäure. Neuerdings stellt man große Mengen Stickstoff durch fraktionierte Destillation der flüssigen Luft dar.

3b) Chemisch reinen Stickstoff erhält man nur aus seinen Verbindungen. Sehr bequem läßt sich reiner Stickstoff darstellen durch Erwärmen einer konzentrierten wässerigen Lösung, die Kaliumnitrit und Ammonchlorid in äquimolekularen Mengen enthält. Durch doppelte Umsetzung entsteht zunächst Ammoniumnitrit $KNO_2 + NH_4Cl = NH_4NO_2 + KCl$ und dieses zerfällt dann in Stickstoff und Wasser $NH_4NO_2 = N_2 + 2H_2O$. Da der so entwickelte Stickstoff stets geringe Mengen Stickoxyd enthält, so wird er zur Reinigung über glühendes Kupfer und dann durch konzentrierte Schwefelsäure geleitet.

Auch durch Erhitzen von Stickoxyd mit Ammoniak entsteht reiner Stickstoff.

Dagegen erhält man beim Einleiten von Chlor in wässeriges Ammoniak $8NH_3 + 3Cl_2 = 6NH_4Cl + N_2$ ein sauerstoffhaltiges Gas. Auch besteht die Gefahr, daß sich der heftig explodierende Chlorstickstoff bildet.

4. **Eigenschaften.** Der Stickstoff ist bei gewöhnlicher Temperatur ein farbloses, geruch- und geschmackloses Gas. Die Dichte des argonhaltigen Stickstoffs, auf Luft = 1 bezogen, ist 0,97206. Im Jahre 1893 fand zuerst Lord Rayleigh, daß der aus Luft hergestellte Stickstoff eine etwas größere Dichte hat als der aus chemischen Verbindungen erhaltene. Diese Beobachtung führte zur Entdeckung des Argons. Die Dichte des chemisch reinen Stickstoffs ist 0,96727 (bezogen auf Luft = 1).

Ein Liter wiegt bei 0° und 760 mm Druck 1,2506 g.

Der Ausdehnungskoeffizient wurde zu $\alpha = 0,0036677$ bestimmt, er ist unabhängig von der Temperatur. Bei geringen Drucken, unterhalb 1 mm Hg, gehorcht der Stickstoff dem Boyle-Mariotteschen Gesetz sehr genau. Bei höheren Drucken ist der Quotient $\frac{p_1v_1}{p_2v_2}$ etwas größer als 1.

Die Verflüssigung des Stickstoffs, allerdings nur auf wenige Sekunden, gelang zuerst L. Cailletet im Jahre 1877, als er auf —29° abgekühlten und unter einem Druck von 200 Atmosphären stehenden Stickstoff sich plötzlich ausdehnen ließ. Eine dauernde Verflüssigung erzielte Olszewski durch Verwendung von im Vakuum siedenden Aethylen als Kühlmaterial (Siedepunkt —150° bei 10 mm).

Sehr bequem, auch in der Vorlesung, läßt sich Stickstoff in dem Apparat von Erdmann-Deschauer (Fig. 1) verflüssigen. Eine Vorkühlschlange A und ein mit einem Ablaßventil versehenes Sammelgefäß B aus Kupfer (Probedruck 25 Atmosphären, Inhalt ca. 3/4 l) sind nebeneinander angeordnet und werden durch Eintauchen in flüssige Luft, die sich in weiten Weinholdschen Gefäßen befindet, von außen abgekühlt. Der Apparat wird an eine Stahlflasche mit reinem, verdichtetem Stickstoff angeschlossen. Bei einem Ueberdruck von 3 bis 4 Atmosphären liefert der Apparat in 10 Minuten etwa ½ l flüssigen Stickstoff.

Der flüssige Stickstoff ist farblos. Der kritische Druck beträgt 35 Atmosphären, die kritische Temperatur —146° C, das kritische Volumen 42,6. Der Siedepunkt liegt bei 760 mm bei —195,5°. Spez. Gewicht bei —195,5° = 0,8042.

Fester Stickstoff, welcher zuerst von Olszewski erhalten wurde, ist ein weißer, kristallinischer Körper, der bei —210,5° (86 mm Druck) schmilzt. Spez. Gewicht bei —252,5° s = 1,0265.

Die spezifische Wärme des gasförmigen Stickstoffs bei konstantem Druck c_p = 0,2348 zwischen 0° und 200°. Das Verhältnis der spezifischen Wärmen bei konstantem Druck und konstantem Volumen $\frac{c_p}{c_v} = 1,41$. Die spezifische Wärme des flüssigen Stickstoffs ist = 0,430 cal, seine Verdampfungswärme (für 1 g) = 47,65 cal. Die Schmelzwärme des festen Stickstoffs wurde zu 12,8 cal berechnet.

Der Brechungsexponent des gasförmigen Stickstoffs für weißes Licht n = 1,000302, bezogen auf Luft n = 1,0163. Die Atomrefraktion hat je nach der Art der Bindung des Stickstoffs sehr verschiedene Werte, z. B. in

primären	Aminen	2,322
sekundären	„	2,502
tertiären	„	2,840
Nitrilen	„	3,118

Die Werte gelten für Natriumlicht und sind nach der Lorentz-Lorenzschen Formel berechnet.

Stickstoff ist in Wasser nur sehr wenig löslich.

1 ccm Wasser löst bei 0° 0,02348 ccm Stickstoff
1 ccm Wasser löst bei 20° 0,01542 ccm Stickstoff
1 ccm Wasser löst bei 50° 0,01087 ccm Stickstoff

In Alkohol löst er sich etwas mehr: 1 ccm Alkohol löst bei 19° 0,12053 ccm. Ein Liter mit Luft gesättigtes Wasser enthält bei 20° 12,76 ccm Stickstoff.

Flüssiger Sauerstoff absorbiert große Mengen Stickstoff. Auch Holzkohle nimmt reichlich Stickstoff auf.

Elementarer Stickstoff ist sehr wenig reaktionsfähig und verbindet sich direkt nur mit einigen wenigen Elementen. Die Vereinigung mit Wasserstoff zu NH_3 oder mit Sauerstoff zu NO erfolgt mit meßbarer Geschwindigkeit erst bei höherer Temperatur. Bei sehr hoher Temperatur (über 1000°) verbindet er sich mit Bor und auch mit Silicium. Zu den Metallen hat der Stickstoff größere Affinität. Am leichtesten verbindet er sich mit dem Lithium, welches schon bei gewöhnlicher Temperatur größere Mengen unter Bildung von Li_3N absorbiert. Auch mit dem Calcium verbindet er sich schon bei gewöhnlicher Temperatur, mit den anderen Erdalkalimetallen dagegen erst bei Rotglut. Mit Magnesium und einigen anderen Metallen verbindet er sich bei Weißglut.

Mit dem Atomgewicht 14,01 steht der Stickstoff in der ersten Horizontalreihe des periodischen Systems an fünfter Stelle. Er zeigt in seinem chemischen Verhalten Aehnlichkeit mit den benachbarten Elementen, dem Phosphor in derselben Gruppe und dem Kohlenstoff und Silicium bezw. dem Sauerstoff und Schwefel in den benachbarten Gruppen. Er gehört wie diese zu den elektronegativen Elementen und er hat demgemäß eine größere Affinität zu den elektropositiven Elementen.

Ueber die Wertigkeit des Stickstoffs herrschen bis heute noch verschiedene Ansichten. Es steht zwar unzweifelhaft fest, daß der Stickstoff in den meisten Verbindungen dreiwertig ist, doch gibt es zahlreiche Verbindungen, deren Bau bei Annahme von dreiwertigem Stickstoff nicht zu erklären ist und man nahm deshalb früher allgemein auch fünfwertigen Stickstoff an. Diese Fünfwertigkeit wird auch heute noch verteidigt unter Berücksichtigung der Tatsache, daß von den fünf Valenzen nur vier gleichartige (elektropositive) Atome oder Radikale zu binden vermögen, daß dagegen die fünfte durch ein elektronegatives Atom oder Radikal befriedigt wird. Während so das Verhalten der zahlreichen Ammon-, Hydroxylamin- und Hydrazinsalze befriedigend erklärt wird, versagt die Fünfwertigkeitstheorie gegenüber den noch zahlreicheren additionellen Verbindungen. Die von **Werner** gemachte Annahme, daß das dreiwertige Stickstoffatom unter Umständen noch eine sogenannte Nebenvalenz betätigen kann, führt zu einer einheitlichen Auffassung über den Bau aller Stickstoffverbindungen.

Zugleich erklärt diese Theorie die Existenz räumlich-isomerer Stickstoffverbindungen, die sich teils, wie optisch-aktive Kohlenstoffverbindungen, nur durch ihr Verhalten im polarisierten Licht, teils auch durch wesentlich andere chemische und physikalische Eigenschaften voneinander unterschieden. Jene enthalten ein asymmetrisches Stickstoffatom d. h. es sind, abgesehen vom Säurerest X, vier verschiedene positive Radikale R_1, R_2, R_3, R_4 in tetraedrischer Anordnung mit dem Stickstoffatom verbunden, $\left(\begin{array}{ccc} R_1 & & R_3 \\ & N & \\ R_2 & & R_4 \end{array}\right) X$. Die z. B. bei gewissen Platinammoniaken auftretenden Isomeren mit verschiedenen chemischen und physikalischen Eigenschaften lassen sich ebenfalls durch Raumformeln veranschaulichen: so schreibt man dem Platinamminchlorid die Formel

$$\begin{array}{ccccc} & & NH_3 & & \\ & Cl & & Cl & \\ / & & Pt & / & \\ Cl & & & Cl & \\ & & NH_3 & & \end{array}$$

, dem Platinsemidiamminchlorid die Formel

$$\begin{array}{ccccc} & & Cl & & \\ & Cl & & NH_3 & \\ / & & Pt & / & \\ Cl & & & NH_3 & \\ & & Cl & & \end{array}$$

zu (vgl. den Artikel „Valenzlehre").

Aus der geringen Leitfähigkeit des flüssigen Ammoniaks muß man auf die Existenz der allerdings sehr schwachen Ionen N''', NH'' und NH_2' schließen. Die sauerstoffhaltigen Ionen sind um so stärker, je mehr Sauerstoff sie enthalten. So gehört das Nitration NO_3' zu den stärksten Anionen, das Nitrition NO_2' ist nur schwach und das am wenigsten Sauerstoff enthaltende Ion der untersalpetrigen Säure N_2O_2'' noch schwächer. Das Ammoniumion $NH_4^{\cdot}$ dagegen ist eines der stärksten Kationen, wahrscheinlich noch stärker als das Kaliumion $K^{\cdot}$. Zur Bildung von komplexen Ionen sind von den Stickstoffverbindungen besonders das Ammoniak, das Hydrazin und das Hydroxylamin befähigt. Vor allem ist das Ammoniak imstande, sich an Verbindungen K_mA_n derart anzulagern, daß es mit dem Kation $K^{\cdot}$ zu einem komplexen Ion zusammentritt, wodurch die Elektroaffinität des Ions bedeutend erhöht wird.

5. **Analytische Chemie.** Eine qualitative Reaktion auf elementaren Stickstoff gibt es nicht. Auch läßt er sich nach den gebräuchlichen gasanalytischen Methoden weder durch Absorption noch durch Verbrennung bestimmen. Er wird in einem Gasgemisch stets aus der Differenz von 100 bestimmt, d. h. man gibt den nach Entfernung aller absorbierbaren und verbrennbaren Gase verbleibenden Gasrest als Stickstoff an.

Nachweis und Bestimmung des Stickstoffs in Verbindungen: a) in organischen Substanzen. Man erhitzt die auf Stickstoff zu prüfende organische Substanz mit metallischem Natrium in einem engen Probierröhrchen, wobei

sich Natriumcyanid, NaCN, bildet, wenn die Substanz Stickstoff enthält. Das noch heiße Röhrchen taucht man in Wasser, filtriert, nachdem sich das überschüssige Natrium zersetzt hat, von Glassplittern und Kohlenstoff ab und fügt zu der alkalischen Lösung zwei Tropfen einer gesättigten Eisenvitriollösung und ebensoviel Eisenchloridlösung hinzu. Beim Kochen bildet sich dann Ferrocyannatrium und es entsteht, wenn die Lösung nach dem Erkalten mit Salzsäure angesäuert wird, ein Niederschlag von Berlinerblau. Ist nur wenig Stickstoff vorhanden, so entsteht eine blaugrüne Lösung, die erst nach längerem Stehen einen Niederschlag absetzt. Zur quantitativen Bestimmung des Stickstoffs wird die Substanz mit Kupferoxyd in einem Strom von Kohlendioxyd verbrannt, wobei sich der Stickstoff als solcher abspaltet. Er wird über Kalilauge, welche das Kohlendioxyd absorbiert, aufgefangen und es wird das erhaltene Volumen gemessen. Zur Reduktion etwa entstandener Oxyde des Stickstoffs wird in das Verbrennungsrohr eine blanke Kupferspirale eingeschoben Sehr bequem läßt sich der Stickstoff nach der Kjeldahlschen Methode bestimmen. Erhitzt man eine stickstoffhaltige organische Substanz (1 bis 2 g) mit konzentrierter Schwefelsäure (15 ccm) und etwas Quecksilber, so wird die organische Substanz durch Oxydation vollständig zerstört und der Stickstoff quantitativ in Ammonsulfat übergeführt. Nach vollständiger Zersetzung der organischen Substanz und nach dem Erkalten spült man die Lösung in einen Destillationskolben, verdünnt mit Wasser und fügt rasch 80 ccm Natronlauge (spez. Gew. 1,35) und soviel Kaliumsulfid hinzu, das alles Quecksilber als Sulfid gefällt wird. Dann verbindet man den Kolben schnell mit dem Kühlrohr und einer Vorlage, welche mit einer gemessenen Menge titrierter Säure beschickt wurde und destilliert die Hälfte des Kolbeninhaltes ab. Der Ueberschuß der vorgelegten Säure wird mit gestellter Natronlauge unter Verwendung von Paranitrophenol als Indikator zurücktitriert und aus der Menge der durch das Ammoniak neutralisierten Säure der Stickstoffgehalt der Substanz berechnet.

5b) In anorganischen Substanzen. Das Ammoniumion $NH_4^{\cdot}$ gibt mit dem Anion der Platinchlorwasserstoffsäure ein schwer lösliches, gelbes, kristallinisches Salz

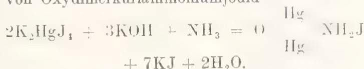


$$2NH_4Cl + H_2PtCl_6 = (NH_4)_2PtCl_6 + 2HCl.$$

Durch Zusatz von Alkohol wird die Fällung quantitativ. Man bringt entweder das bei 105° getrocknete Salz oder das daraus durch Glühen entstandene Platin zur Wägung. Da die Alkalien Kalium, Rubidium und Cäsium ähnliche Fällungen geben, so ist diese Methode nur bei Abwesenheit dieser Alkalien brauchbar.

Einfacher ist es, das aus Ammonsalzen durch Erhitzen mit einer stärkeren Base (NaOH, KOH) freigemachte Ammoniak nachzuweisen oder zu bestimmen. Es gibt sich leicht durch den intensiv stechenden Geruch oder dadurch zu erkennen, daß es rotes Lackmuspapier bläut. Zur quantitativen Bestimmung destilliert man das frei gemachte Ammoniak in vorgelegte überschüssige Säure bekannter Normalität und titriert die nicht neutralisierte Säure zurück.

Spuren von Ammoniak bezw. von Ammonsalzen in Trink- oder Mineralwässern lassen sich mit Sicherheit durch Nesslers Reagens, eine mit Kalilauge versetzte Auflösung von Merkurijodid in Jodkalium, nachweisen. Es entsteht damit eine gelbe Färbung oder, bei etwas größeren Mengen Ammoniak, ein rotbrauner Niederschlag von Oxydimerkuriammoniumjodid



$$2K_2HgJ_4 + 3KOH + NH_3 = O\begin{matrix}Hg\\ \\Hg\end{matrix}NH_2J + 7KJ + 2H_2O.$$

Durch Vergleichung der Farbe, welche eine Lösung unbekannten Gehaltes nach Zusatz von Nesslers Reagens gilbt, mit den Farben verschiedener Lösungen bekannten Gehaltes lassen sich Spuren von Ammoniak leicht quantitativ bestimmen.

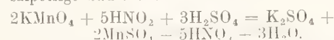
Salpetrige Säure. Die empfindlichste und zugleich charakteristische Reaktion auf salpetrige Säure beruht auf der Bildung von intensiv gefärbten Azofarbstoffen. Man verwendet zweckmäßig eine Auflösung von 0,5 g Sulfanilsäure in 150 ccm verdünnter Essigsäure, die mit einer filtrierten Lösung von 0,2 g α-Naphtylamin in 150 ccm Essigsäure gemischt wird. Das Reagens wird vor allem zum Nachweis von salpetriger Säure in Trinkwasser benutzt und gibt mit den geringsten Spuren (bis $^1/_{1000}$ Milligramm pro Liter) nach 5 bis 10 Minuten eine deutliche Rotfärbung. Salpetersäure gibt diese Reaktion nicht. Kolorimetrisch läßt sich salpetrige Säure mit dem Reagens leicht und sicher bestimmen.

Aus einer mit Schwefelsäure angesäuerten Lösung von Jodkalium macht salpetrige Säure Jod frei



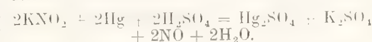
$$2KJ + 2KNO_2 + 2H_2SO_4 = 2K_2SO_4 + 2NO + 2H_2O + J_2.$$

Auch diese Reaktion ist bei Zusatz von Stärkekleister äußerst empfindlich, da aber Eisenoxydsalze und viele andere oxydierende Stoffe ebenso reagieren, so ist sie nur bei Abwesenheit derselben brauchbar. Durch Rücktitration des ausgeschiedenen Jods mit Natriumthiosulfatlösung läßt sich salpetrige Säure quantitativ bestimmen; ebenso durch Titration mit Kaliumpermanganat, dessen schwefelsaure Lösung durch salpetrige Säure entfärbt wird.

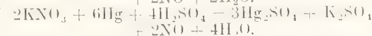


$$2KMnO_4 + 5HNO_2 + 3H_2SO_4 = K_2SO_4 + 2MnSO_4 + 5HNO_3 + 3H_2O.$$

Gasvolumetrisch läßt sich salpetrige Säure, ebenso wie Salpetersäure, durch Zersetzen mit konzentrierter Schwefelsäure und Quecksilber und Messen des entwickelten Stickoxyds im Nitrometer bestimmen.



$$2KNO_2 + 2Hg + 2H_2SO_4 = Hg_2SO_4 + K_2SO_4 + 2NO + 2H_2O.$$



$$2KNO_3 + 6Hg + 4H_2SO_4 = 3Hg_2SO_4 + K_2SO_4 + 2NO + 4H_2O.$$

Salpetersäure. Fast alle Nitrate sind leicht löslich. Nur mit einigen organischen Basen bildet das Nitration schwer lösliche Salze, so z. B. mit dem Diphenylendanilohydrotriazol, kurz „Nitron" genannt, das kristallinische, leicht filtrierbare Nitrat $C_{20}H_{16}N_4.HNO_3$. Zur Abscheidung der Salpetersäure benutzt man das Nitronacetat. Das ausgefällte Nitronnitrat wird über einem Gooch-Neubauer Platintiegel filtriert, mit wenig Eiswasser gewaschen, bei 110° getrocknet und gewogen.

Im übrigen gründen sich Nachweis und quantitative Bestimmung auf die oxydierenden Eigenschaften der Salpetersäure. Es ist deshalb oft nicht leicht Salpetersäure einwandfrei nachzuweisen, da viele oxydierende Substanzen ähnliche Reaktionen geben.

Mit einer Auflösung von Diphenylamin in konzentrierter Schwefelsäure gibt Salpetersäure eine kornblumenblaue Färbung. Die Reaktion ist sehr empfindlich, aber nur dann brauchbar, wenn andere oxydierende Substanzen, wie Ferrisalze, Chlorate, Nitrite usw. nicht zugegen sind, da diese die gleiche Färbung geben.

Brucin, in konzentrierter Schwefelsäure gelöst, erzeugt in einer mit der dreifachen Menge konzentrierter Schwefelsäure versetzten salpetersäurehaltigen Lösung eine rote Färbung, die bald in Goldgelb und Grüngelb übergeht. Salpetrige Säure gibt diese Reaktion nicht, wenn die Lösung stark schwefelsauer ist.

Versetzt man eine nitrathaltige Lösung mit einer kalt gesättigten Lösung von Eisenvitriol und unterschichtet vorsichtig mit konzentrierter Schwefelsäure, so tritt an der Berührungszone der beiden Flüssigkeiten eine Braunfärbung auf.

$$6FeSO_4 + 4H_2SO_4 + 2KNO_3 = 3Fe_2(SO_4)_3 + K_2SO_4 + 4H_2O + 2NO.$$

Das entstandene Stickoxyd bildet mit überschüssigem Ferrosulfat die dunkelbraune, leicht zersetzliche Verbindung $FeSO_4.NO$. Salpetrige Säure gibt die gleiche Reaktion.

Quantitativ bestimmt man Salpetersäure am einfachsten durch Reduktion zu Ammoniak mittels Zink oder Dewardas Legierung (50% Kupfer + 45% Aluminium + 5% Zink) und Natronlauge. Das entstandene Ammoniak wird dann durch Destillation in vorgelegte Säure und Rücktitration der überschüssigen Säure bestimmt.

Ferner wird die Salpetersäure oft gasanalytisch gemessen, indem man sie entweder im Nitrometer zu Stickoxyd reduziert oder indem man die Reduktion mit überschüssiger, salzsaurer Eisenchlorürlösung bewirkt, die entstandene braune Verbindung $FeCl_2.NO$ durch Erhitzen zersetzt und das Stickoxyd über Wasser auffängt. Der Destillationskolben und das Verbindungsrohr desselben mit dem Gasmeßrohr müssen vollkommen von Luft frei sein, was man durch Kochen der reinen, verdünnten Nitratlösung erreicht. Erst wenn sich die Wasserdämpfe vollständig unter dem Meßrohr kondensieren, läßt man die salzsaure Eisenchlorürlösung zufließen.

6. Spezielle Chemie. Verbindungen des Stickstoffs mit Wasserstoff. Es sind fünf verschiedene Verbindungen bekannt, die nur aus Stickstoff und Wasserstoff bestehen: das Ammoniak, NH_3, das Hydrazin, N_2H_4, die Stickstoffwasserstoffsäure, N_3H, und zwei salzartige Verbindungen: das stickstoffwasserstoffsaure Ammonium, N_4H_4, und das stickstoffwasserstoffsaure Hydrazin, N_5H_5. Von diesen Verbindungen ist bei weitem die wichtigste das

Ammoniak, NH_3. In der Natur entsteht es hauptsächlich durch Fäulnis stickstoffhaltiger Pflanzen- und Tierstoffe und es gelangt dadurch in den Boden und die atmosphärische Luft. In der Luft wird es durch die vorhandene Kohlensäure und die durch elektrische Entladungen entstehende salpetrige Säure in Ammonkarbonat bezw. in Nitrit oder Nitrat übergeführt und so wird es verständlich, daß auch das Regenwasser geringe Mengen Ammoniak enthält. In der Nähe von Vulkanen findet es sich als Chlorid oder Sulfat und auch die Mineralwässer enthalten stets allerdings geringe Mengen von Ammonsalzen. Endlich kommt es in Spuren im lebenden Pflanzen- und Tierkörper vor z. B. im Saft der Zuckerrübe, im Blut usw. Im Harn der Vögel und Reptilien sind etwas größere Mengen enthalten.

Ammoniak entsteht aus den Elementen beim Durchschlagen elektrischer Funken oder bei Anwesenheit gewisser katalytisch wirkender Substanzen und umgekehrt zerfällt das Ammoniak in Stickstoff und Wasserstoff unter denselben Bedingungen, so daß schließlich ein Gleichgewichtszustand erreicht wird, wobei in der Zeiteinheit gleichviel Ammoniak gebildet und zersetzt wird.



$$N_2 + 3H_2 \rightleftarrows 2NH_3 + 2.11,89\ Cal.$$

Bei der Bildung des Ammoniaks wird Wärme entwickelt und das Gleichgewicht wird sich deshalb, wie bei allen exothermen Reaktionen, mit sinkender Temperatur zugunsten der exothermen Verbindung, des Ammoniaks, verschieben. Da aber bei niedrigerer Temperatur die Reaktion sehr langsam verläuft, so wird der Gleichgewichtszustand nur bei Anwesenheit katalytisch wirkender Substanzen wie Eisen, Mangan, Osmium, Chromoxyd usw. mit genügend großer Geschwindigkeit erreicht. Bezeichnet man mit p_{NH_3} den Partialdruck des Ammoniaks im Gasgemisch, mit p_{N_2} den des Stickstoffs und mit p_{H_2} den des Wasserstoffs, so gilt bei einer bestimmten Temperatur für das Gleichgewicht die Beziehung $\frac{p_{NH_3}}{p_{N_2}^{1/2} \cdot p_{H_2}^{3/2}} = K$. Diese Gleichgewichtskonstante ist abhängig von der Temperatur und wird mit sinkender Temperatur größer werden. Haber gibt folgende Werte dafür an, bei Verwendung von Eisen als Katalysator und wenn im ursprünglichen Gasgemisch das Verhältnis von N:H = 1:3 ist und die Gase unter einem Druck von 30 Atmosphären stehen:

t. C°	% NH_3	$K.10^4$
971	0,152	1,50
901	0,207	2,13
801	0,344	3,50
700	0,654	6,80

Wird Eisen als Katalysator verwandt und die Vereinigung unter 150 bis 250

Atmosphären Druck vorgenommen, so kann man bei 650 bis 750° pro Liter Kontaktraum in der Stunde 250 g Ammoniak gewinnen. Es ist noch zweifelhaft, ob die direkte Synthese des Ammoniaks technische Bedeutung erlangen wird (vgl. dazu den Artikel „Stickstoffverwertung"). Ferner entsteht Ammoniak aus stickstoffhaltigen Verbindungen auf mannigfaltige Weise, z. B. durch Reduktion der Stickstoffsauerstoffsäuren durch naszierenden Wasserstoff in alkalischer Lösung. Wichtig ist noch die Bildung des Ammoniaks aus Metallnitriden durch Hydrolyse. $Mg_3N_2 + 3H_2O = 3MgO + 2NH_3$. Da sich das Magnesium (wie auch das Lithium und Calcium) direkt mit Stickstoff verbindet, so läßt sich der Luftstickstoff auf diese Weise in Ammoniak überführen.

Zur Darstellung kleinerer Mengen Ammoniak erhitzt man Chlorammon mit Aetzkalk, oder bequemer eine konzentrierte wässerige Lösung von Ammoniak (spez. Gew. 0,91). Wird diese Lösung zuvor mit Chlorcalcium gesättigt, so ist das entwickelte Ammoniak fast vollkommen trocken, anderenfalls wird es durch Ueberleiten über Calciumoxyd oder festes Aetzkali getrocknet. Auch durch Auftropfen einer konzentrierten wässerigen Ammoniaklösung auf festes Aetzkali läßt sich trockenes Ammoniak herstellen. Ganz rein, d. h. frei von Spuren teeriger Bestandteile, die im käuflichen Ammoniak stets vorhanden sind, erhält man es durch Erhitzen einer Lösung von Kaliumnitrit mit Kalilauge und Eisen und Zink.



$$3Zn + 5KOH + KNO_2$$
$$= 3Zn(OK)_2 + NH_3 + H_2O.$$

Im großen wird bis heute das Ammoniak fast ausschließlich als Nebenprodukt bei der Leuchtgasfabrikation gewonnen. Es entsteht dabei neben vielen anderen gasförmigen Produkten aus den stickstoffhaltigen Bestandteilen der Kohle, wenn diese trocken destilliert wird und es findet sich teils frei, teils als Karbonat, Rhodanat usw. in dem sogenannten Gaswasser. D. h. in dem Wasser, durch welches die aus der Retorte kommenden Gase zwecks Reinigung geleitet werden. Durch Destillation des Gaswassers mit Kalk wird das Ammoniak ausgetrieben und dann in Ammonchlorid oder Ammonsulfat übergeführt. Diese Salze reinigt man durch Umkristallisieren und treibt aus ihnen durch Erhitzen mit Kalk nochmals das Ammoniak aus, welches nunmehr wieder in Wasser geleitet oder aber komprimiert wird.

Früher stellte man das Ammoniak durch trockene Destillation tierischer Abfälle (Knochen, Hörner usw.) her, wobei sich auch Ammonkarbonat, Hirschhornsalz genannt, bildet.

Das Ammoniak ist ein farbloses, intensiv stechend riechendes Gas. Es ist leichter als Luft, seine Dichte (auf Luft = 1 bezogen) ist 0,5971. Ein Liter wiegt bei 0° und 760 mm Druck 0,7713 g. Der Ausdehnungskoeffizient ist größer als bei schwer komprimierbaren Gasen, zwischen 0° und 50° ist $\alpha = 0{,}003854$. Es ist leichter kompressibel als Stickoxydul und Kohlensäure. Die spezifische Wärme bei konstantem Druck ist $c_p = 0{,}89$ bei 100°, die bei konstantem Volumen $c_v = 0{,}5202$. Der Brechungsexponent für weißes Licht ist 1,000381.

Das Ammoniak läßt sich leicht in eine farblose, leicht bewegliche Flüssigkeit überführen, und zwar bei Atmosphärendruck, wenn man es durch ein Gemisch von Eis und kristallisiertem Chlorcalcium auf etwa —40° abkühlt. Der Siedepunkt des flüssigen Ammoniaks bei 760 mm Druck liegt bei —33,5°. Die kritische Temperatur und der kritische Druck betragen +130° bezw. 115 Atmosphären. Kühlt man das flüssige Ammoniak weiter ab, so erstarrt es zu weißen, durchsichtigen Kristallen, die bei —75° bis —77° schmelzen.

Reines flüssiges Ammoniak leitet den elektrischen Strom nur schlecht, spezifische Leitfähigkeit $\lambda = 1{,}33 . 10^{-7} \frac{1}{\Omega}$ bei —79,3°. Die Ursache der Leitfähigkeit ist wohl in einer, wenn auch geringen, Dissoziation des Ammoniaks zu suchen, entsprechend den Formeln $NH_3 \rightleftarrows NH_2' + H^{\cdot}$; $NH_3 \rightleftarrows NH'' + 2H^{\cdot}$; $NH_3 \rightleftarrows N''' + 3H^{\cdot}$. Die Dielektrizitätskonstante wurde zu 21 bis 23 bestimmt.

Flüssiges Ammoniak vermag sehr viele Substanzen ohne Veränderung derselben zu lösen z. B. Nitrate, Nitrite, Cyanide, Cyanate, Halogenide und sehr viele organische Substanzen. Unlöslich dagegen sind Metalloxyde, Sulfate, Karbonate, Phosphate und viele Sulfide. Die molekulare Siedepunktserhöhung ist etwa 3,4°, also fast so groß wie die des Wassers. Jedoch läßt sich nur bei einer beschränkten Anzahl von Substanzen deren Molekulargewicht mit Hilfe dieser Konstante aus der Siedepunktserhöhung, welche eine Lösung bestimmter Konzentration gegenüber dem reinen flüssigen Ammoniak aufweist, berechnen. Denn die meisten Substanzen sind im flüssigen Ammoniak teils assoziiert, teils elektrolytisch dissoziiert. Entsprechend der kleineren Dielektrizitätskonstante ist die Dissoziation der im flüssigen Ammoniak gelösten Verbindungen eine geringere als im Wasser und die trotzdem vielfach beobachtete größere elektrische Leitfähigkeit ist auf eine größere Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen im flüssigen Ammoniak zurückzuführen.

Gasförmiges Ammoniak wird leicht von Wasser, Alkohol, Aceton, Benzol, Chloroform usw. gelöst. Wasser absorbiert bei 0° das 1142fache seines Volumens, wenn der Partialdruck des Ammoniaks 760 mm ist. Folgende Tabelle gibt das spezifische Gewicht und den Prozentgehalt wässeriger Ammoniaklösungen.

D_4^{15}	% NH_3	D_4^{15}	% NH_3
0,990	2,31	0,930	18,64
0,980	4,80	0,920	21,75
0,970	7,31	0,910	24,99
0,960	9,91	0,900	28,33
0,950	12,74	0,890	31,73
0,940	15,63	0,880	35,60

Bei niedrigen Temperaturen ist die Absorption des Ammoniaks durch Wasser bei wechselndem Druck diesem nicht proportional, d. h. für die Absorption gilt das Henry-Daltonsche Gesetz nicht. Bei steigender Temperatur entspricht die Löslichkeit immer mehr dem Gesetz und bei 100° gehorcht sie ihm vollständig. Aus dieser Abweichung vom Henry-Daltonschen Gesetz folgt, daß bei der Absorption auch eine chemische Reaktion des Ammoniaks mit dem Wasser stattfinden muß und dieser Schluß wird dadurch gestützt, daß einmal die wässerige Lösung schwach basische Eigenschaften hat und ferner, daß die Differenz zwischen der Lösungs- und Kondensationswärme sehr groß ist. Ueber die Art der Reaktion existieren zwei Auffassungen. Nach der älteren vereinigt sich das Ammoniak mit dem Wasser zum Ammoniumhydroxyd $NH_3 + H_2O \rightleftarrows NH_4OH$, welches dann in Ammonium- und Hydroxylionen dissoziiert. $NH_4OH \rightleftarrows NH_4^{\cdot} + OH'$. Nach der Wernerschen Theorie addiert sich das Ammoniak mit einer Nebenvalenz an das Wasserstoffion des Wassers $NH_3 + H^{\cdot} \rightleftarrows NH^{\cdot}_4$ (entsprechend der Addition von Ammoniak an Metallionen), was eine weitere Dissoziation des Wassers $H_2O \rightleftarrows H^{\cdot} + OH'$ verursachen muß. Ferner ist nachgewiesen, daß die wässerige Lösung außer Ammonium- und Hydroxylionen freies Ammoniak und Ammoniakhydrate $(NH_3)x.(H_2O)y$ enthält. Die Leitfähigkeit wässeriger Ammoniaklösungen ist nur gering und da auch die Beeinflussung der Verseifungsgeschwindigkeit von Estern etwa 40 mal kleiner und die Neutralisationswärme um 1,5 Kalorien kleiner als für Natronlauge ist, so folgt, daß das Ammoniak in wässeriger Lösung eine schwache Base ist.

Die Wanderungsgeschwindigkeit des Ammoniumions ist 64,2 bei 18°, woraus sich die Aequivalentleitfähigkeit des Ammoniumhydroxyds bei unendlicher Verdünnung $\Lambda_\infty = 238,2$ berechnet. In einer $\frac{n}{100}$-Lösung sind etwa 4%, in einer $\frac{n}{10}$-Lösung etwa 1% des gesamten Ammoniaks dissoziiert, vorausgesetzt, daß nur Ammonium- und Hydroxylionen in der Lösung vorhanden sind.

Aus der wässerigen Lösung läßt sich ein Teil des Ammoniaks durch indifferente organische Lösungsmittel ausschütteln. Zwischen Wasser und Chloroform verteilt sich bei 25° das Ammoniak so, daß die in gleichen Volumina vorhandenen Mengen freien oder hydratisierten Ammoniaks (nicht NH_4OH) sich verhalten wie 25:1. Dieses Verhältnis ist unabhängig von der Konzentration, dagegen ändert es sich mit der Temperatur und zwar so, daß bei tiefer Temperatur sich mehr Ammoniak im Wasser, bei höherer sich mehr in Chloroform löst, woraus man auf eine Hydratisierung schließen kann.

Ammonium, NH_4. Alle Versuche, das in seinen Salzen den Alkalimetallen so ähnliche Ammonium herzustellen, sind erfolglos geblieben. Dagegen ist es gelungen, durch Elektrolyse konzentrierter Ammonchloridlösung und bei Verwendung von Quecksilber als Kathode ein Ammoniumamalgam zu erhalten. Auch durch Umsetzung von Alkaliamalgam mit Ammonsalzen entsteht das Ammoniumamalgam. Bei niedrigen Temperaturen (—80°) ist das Amalgam fest und spröde und vollkommen haltbar; bei —30° fängt es an sich ohne Gasentwickelung aufzublähen und bei 0° ist es weich. Läßt man es längere Zeit bei gewöhnlicher Temperatur stehen, so zerfällt es in Quecksilber und ein Gemisch von 1 Vol. Wasserstoff und 2 Vol. Ammoniak.

Ammonsalze entstehen entweder durch direkte Vereinigung von gasförmigem Ammoniak mit Säuren oder durch Neutralisation derselben mit Ammoniak in wässeriger Lösung. Hat das Anion der Säure stark oxydierende Eigenschaften, so sind deren Ammonsalze unbeständig oder überhaupt nicht existenzfähig. So zersetzt sich das Ammonnitrit sowohl im trockenen Zustande wie in wässeriger Lösung leicht in Stickstoff und Wasser, das Nitrat liefert beim Erhitzen Stickoxydul und es ist nicht gelungen, das Ammoniumhypochlorit in fester Form herzustellen. Im übrigen zeigen die Ammonsalze große Aehnlichkeit mit den Alkalimetallen sowohl in den Kristallformen und Löslichkeitsverhältnissen als auch in der elektrolytischen Dissoziation. Folgende Zusammenstellung diene zum Vergleich der bei 18° bestimmten Molekularleitfähigkeiten:

Mol./Lit.:	0,0001	0,001	0,01	0,1	1
ΛKCl:	129,5	127,6	122,5	111,9	98,2
$ΛNH_4Cl$:	129,2	127,3	122,1	110,7	97,0
ΛNaCl:	109,7	107,8	102,8	92,5	74,4

Dagegen besteht ein wesentlicher Unterschied zwischen Ammonsalzen und Alkalisalzen darin, daß jene, trotz der Stärke des NH_4-Ions, viel leichter hydrolytisch gespalten werden als diese. Die Ursache hierfür ist in dem anormalen Verhalten des Ammoniumhydroxyds zu suchen. Die Hydrolyse wird außerdem noch durch die Flüchtigkeit des Ammoniaks begünstigt. Selbst Lösungen, die Ammonsalze mit den stärksten Anionen wie Cl', NO_3' usw. enthalten, reagieren beim Erhitzen sauer. Charakteristisch ist ferner für die Ammonsalze, daß sie leicht in den Dampfzustand übergehen, wobei eine fast vollständige Dissoziation in Ammoniak und Säure erfolgt.

Sehr interessant ist die Beobachtung, daß festes Ammonnitrat beträchtliche Mengen von Ammoniak absorbieren kann, wobei eine leicht bewegliche, farblose Flüssigkeit, die sogenannte Diverssche Flüssigkeit, entsteht. Die absorbierte Menge ist abhängig von Temperatur und Druck; unter Atmosphärendruck nimmt das Ammonnitrat bei 0° etwa die Hälfte, bei gewöhnlicher Temperatur etwa ein Drittel seines Gewichtes an Ammoniak auf. Die Flüssigkeiten sind als Lösungen von Ammonnitrat und Ammoniak ineinander zu betrachten, die dadurch entstehen, daß der Schmelzpunkt des Salzes durch gelöstes Ammoniak stark erniedrigt, der Siedepunkt des Ammoniaks durch gelöstes Salz stark erhöht wird.

Die Ammonsalze werden in der Wissenschaft und Technik vielfach verwandt. Am meisten angewandt wird wohl das Ammoniumchlorid, NH_4Cl (Salmiak), ein festes, weißes, in Wasser leicht lösliches Salz, welches zur Herstellung von Ammoniak, Salzsäure und vielen anderen Ammonverbindungen dient. Man gebraucht es auch beim Löten, da es beim Erhitzen Salzsäure abspaltet, welche die auf den Metallen befindliche dünne Oxydschicht entfernt. Deshalb wird es auch beim Verzinken und Verzinnen von Metallen verwandt. Ferner findet es in der Farbenfabrikation, der Zeugdruckerei und der Pharmazie vielfache Verwendung. In Wasser gelöst, bildet es die Elektrolytflüssigkeit der Leclanché-Elemente.

Das Ammoniumfluorid NH_4F wird in den Brauereien als desinfizierendes Mittel gebraucht.

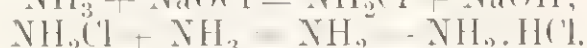
Für die analytische Chemie sind das Schwefelammon $(NH_4)_2S$, das Ammonoxalat $(NH_4)_2C_2O_4$ und das Ammonkarbonat $(NH_4)_2CO_3$ sehr wichtige Reagentien, welche zur Abscheidung bezw. Trennung der Metalle benutzt werden. Bei der elektrolytischen Abscheidung von Metallen wird oft Ammonoxalat zugesetzt, da sich viele Metalle aus ihren Ammondoppeloxalaten in reiner Form abscheiden lassen. Das Schwefelammon wird noch zu Reduktionen besonders von organischen Verbindungen benutzt. Das Ammonkarbonat dient beim Backen zum Auftreiben des Teiges, da es beim Erhitzen nur gasförmige Produkte: Kohlensäure, Ammoniak und Wasser liefert.

In der Sprengstofftechnik finden das Ammonnitrat, das Ammonrhodanat, NH_4CNS, und das Ammonperchlorat, NH_4ClO_4, Verwendung als Sicherheitssprengstoffe.

Das Ammonsulfat ist ein wertvolles Düngemittel.

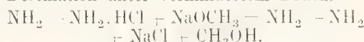
Hydrazin (Diamid) N_2H_4 wurde erst 1887 dargestellt, während Derivate des Hydrazins schon längere Zeit vorher bekannt waren.

Zur Darstellung eignet sich am besten das von Raschig angegebene Verfahren, nach welchem Hydrazinsalze durch Einwirkung von Natriumhypochlorit auf wässerige Ammoniaklösung bei Gegenwart von Leim entstehen. Durch den Zusatz von Leim oder anderen, die Viskosität der Lösung erhöhenden Stoffen, wird die Oxydation des Ammoniaks zu Stickstoff und Wasser verzögert und es entsteht zunächst Monochloramin NH_2Cl, welches mit Ammoniak Hydrazinchlorhydrat bildet.


$$NH_3 + NaOCl = NH_2Cl + NaOH;$$

$$NH_2Cl + NH_3 = NH_2 - NH_2 . HCl.$$

Ferner entsteht Hydrazin bei der Reduktion von Stickoxydkaliumsulfit mit Natriumamalgam. Hydrazinsalze oder Derivate des Hydrazins erhält man aus vielen organischen Substanzen. Erwähnt sei die Darstellung aus Guanidin, welches beim Behandeln mit Salpetersäure in Nitroguanidin übergeht. Durch Reduktion entsteht hieraus Amidoguanidin, welches durch Säuren in Hydrazinsalz, Kohlensäure und Ammoniak gespalten wird.

Wasserfreies Hydrazin, N_2H_4, kann dargestellt werden entweder durch Entwässern des Hydrates, $N_2H_4 . H_2O$, mit Bariumoxyd und Destillation unter vermindertem Druck in einer Wasserstoffatmosphäre oder durch Umsetzung von Hydrazinchlorhydrat in absolut methylalkoholischer Lösung mit Natriummethylat und fraktionierte Destillation unter vermindertem Druck.


$$NH_2 - NH_2 . HCl + NaOCH_3 = NH_2 - NH_2 + NaCl + CH_3OH.$$

Das überdestillierende Hydrazin wird in mit Wasserstoff gefüllten Röhrchen aufgefangen.

Es ist eine farblose Flüssigkeit, die an der Luft stark raucht. Bei 0° erstarrt sie und schmilzt bei $+1,4°$. $Siedepunkt_{71mm} = 56°$; $Siedepunkt_{762mm} = 113,5°$. $D_4^{15} = 1,0114$. Außer mit Wasser ist es nur noch mit Alkoholen mischbar. Es löst, wie das Ammoniak, viele anorganische Salze und wird leicht von den verschiedensten Reagentien angegriffen.

Hydrazinhydrat, $N_2H_4 . H_2O$. Man versetzt eine konzentrierte Lösung von Hydrazinbromhydrat mit der berechneten Menge konzentrierter Kalilauge und dem gleichen Volumen Alkohol und saugt vom ausgeschiedenen Bromkalium ab. Dann wird destilliert, bis die Temperatur auf 118° gestiegen ist, nochmals filtriert und darauf bei 121 bis 122 mm Druck abdestilliert. Der bei 72 bis 74° überdestillierte Teil wird zur Bindung von Wasser mit Bariumoxyd und dem gleichen Volumen Alkohol versetzt

und bei 131 mm nochmals destilliert. Bei 73° geht 99,7 prozentiges Hydrazinhydrat über.

Es ist eine stark lichtbrechende, etwas schwer bewegliche Flüssigkeit, die stark alkalisch reagiert, hygroskopisch ist und Kohlensäure aus der Luft anzieht. Siedepunkt$_{26mm}$ = 47°. Im Dampfzustande ist das Hydrazinhydrat schon bei 100° teilweise, bei 138° vollständig in Hydrazin und Wasser dissoziiert.

Das Hydrazin vermag zwei Reihen von Salzen zu bilden, indem es sich mit zwei oder mit einem Molekül einer Säure vereinigt Die Salze $N_2H_4.2HAc$, welche mit Ausnahme des Sulfats in Wasser löslich und in Alkohol unlöslich sind, spalten jedoch bei Gegenwart von Wasser oder beim Erhitzen leicht ein Molekül Säure ab und gehen in die beständigeren Salze $N_2H_4.HAc$ über. Diese sind mit Ausnahme des Sulfats in Wasser und warmem Alkohol löslich.

Auch Hydrazindoppelsalze sind bekannt, z. B. $MgCl_2.N_2H_5Cl$; $ZnCl_2.N_2H_5Cl$; $CuSO_4.(N_2H_5)_2SO_4$ usw. Ebenso ist das dem Platinsalmiak entsprechende $PtCl_4.2N_2H_5Cl$ dargestellt worden.

Hydrazin oder Hydrazinsalze sind kräftige Reduktionsmittel. Ammoniakalische Silberlösung und Fehlingsche Lösung werden schon in der Kälte bis zu den Metallen reduziert.

Zum qualitativen Nachweis benutzt man Benzaldehyd, welcher auch aus sehr verdünnten alkalischen oder sauren Lösungen schwer lösliches Benzalazin ausfällt. Aus stark verdünnten Lösungen von $N_2H_4.H_2SO_4$ fällt auf Zusatz von Kupfersulfat ein schwer löslicher, blauer Niederschlag von $CuSO_4.N_2H_4.H_2SO_4$.

Die quantitative Bestimmung von Hydrazinsalzen erfolgt durch Titration mit Jod bei Gegenwart von Natriumbikarbonat, oder mit Kaliumpermanganat in 6 bis 12 prozentiger schwefelsaurer Lösung.

Stickstoffwasserstoffsäure, Azoimid, N_3H, wurde 1890 von Curtius entdeckt. Man läßt bei 190° auf Natriumamid so lange Stickoxydul einwirken, bis kein Ammoniak mehr entweicht.



$$NaNH_2 + N_2O = NaN_3 + H_2O.$$

Aus dem entstandenen Natriumazid wird durch Destillation mit Schwefelsäure die Stickstoffwasserstoffsäure gewonnen.

Aus Hydrazin und Chlorstickstoff entsteht die Säure ebenfalls.



$$N_2H_4 + NCl_3 = N_3H + HCl.$$

Zur Darstellung wird eine wässerige Lösung von Hydrazin mit einer 3,3 prozentigen Lösung von Chlorstickstoff in Benzol geschüttelt und die Flüssigkeit durch Zusatz 10 prozentiger Natronlauge dauernd alkalisch gehalten.

Von den Bildungsweisen der Stickstoffwasserstoffsäure aus organischen Verbindungen sei die Spaltung des Hippurazides $C_6H_5.CONHCH_2.CON_3$ durch alkoholisches Ammoniak erwähnt, wobei Ammoniumazid NH_4N_3 und Hippuramid entsteht. Durch Destillation von Natrium-, Ammonium- oder Bleiazid mit verdünnter Schwefelsäure erhält man die freie Stickstoffwasserstoffsäure, und zwar bei wiederholtem Fraktionieren von 91%, wenn der unterhalb 45° destillierende Anteil gesondert aufgefangen wird. Durch Chlorcalcium kann dieser 91 prozentigen Säure das Wasser vollständig entzogen werden.

Die wasserfreie Säure ist eine farblose Flüssigkeit von stechendem Geruch, welche bei +37° siedet. Sie explodiert bei Berührung mit einem heißen Gegenstand, oft aber auch ohne jede äußere Veranlassung, mit furchtbarer Heftigkeit. Sie ist mit Wasser in jedem Verhältnis mischbar. Aus Leitfähigkeitsmessungen hat sich ergeben, daß die Säure etwa so stark wie die Essigsäure ist. Eine 7 prozentige Säure löst Kupfer, Zink, Magnesium usw.; konzentrierte Lösungen greifen sogar Silber und Gold an. Von den Salzen sind in Wasser schwer löslich das AgN_3, HgN_3, PbN_6, CuN_6. Alle diese Salze explodieren sehr leicht, während NaN_3 beim Erhitzen nur verpufft und das KN_3 geschmolzen werden kann. Während man früher in der Stickstoffwasserstoffsäure eine ringförmige Bindung der Stickstoffatome annahm, $\begin{matrix} N \\ \| \\ N \end{matrix}\!\!>NH$, betrachtet man die Stickstoffwasserstoffsäure und ihre Salze neuerdings als Analoga der aliphatischen Diazoverbindungen und schreibt ihnen demgemäß die Struktur $H - N = N \equiv N$ und $Me^{I}N = N \equiv N$ zu.

Zum qualitativen Nachweis der Säure und ihrer Salze benutzt man Ferrisalzlösungen. Es entsteht damit eine tiefrote, dem Ferrirhodanid ähnliche Färbung. Die Reaktion ist sehr empfindlich und noch deutlich, wenn ein Teil N_3H mit 100000 Teilen Wasser verdünnt ist. Auch das weiße Silbersalz und das rote Kupfersalz werden zum Nachweis benutzt.

Stickstoffwasserstoffsaures Ammonium, NH_4N_3, wird durch Einleiten von Ammoniak in eine alkoholische Lösung von Hippurazid und Ausfällen mit Aether dargestellt. Es bildet, aus Wasser umkristallisiert, große wasserhelle Prismen, die an der Luft trübe werden. Es ist äußerst flüchtig, schon bei Zimmertemperatur verschwinden die Kristalle nach einigen Tagen vollständig. Bei schnellem Erhitzen explodiert es heftig.

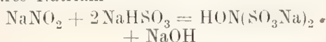
Stickstoffwasserstoffsaures Hydrazin, $N_2H_4.HN_3$, entsteht beim Neutralisieren von

Stickstoffwasserstoffsäure mit Hydrazinhydrat. Große, glasklare Prismen, die an der Luft zerfließen. Es explodiert heftig bei Entzündung mit knallsauren Salzen oder einem weißglühenden Draht.

Hydroxylamin, Oxyammoniak NH_2OH. Eine dem Ammoniak in mancher Beziehung ähnliche Substanz ist das von Lossen im Jahre 1865 entdeckte Hydroxylamin.

Salze desselben entstehen entweder durch Reduktion sauerstoffreicherer Verbindungen des Stickstoffs oder durch Spaltung seiner organischen und anorganischen Derivate. Zur Reduktion eignet sich am besten der Salpetersäureäthylester, welcher mit Zinn und Salzsäure behandelt Hydroxylaminchlorhydrat liefert. Noch praktischer ist es, Salpetersäure elektrolytisch zu reduzieren. Man verwendet amalgamiertes Blei als Kathode und erhält, unter Verwendung von 25prozentiger Salzsäure und einer kathodischen Stromdichte von 120 bis 160 Ampère, bei guter Kühlung und langsamem Zufließenlassen der Salpetersäure Hydroxylaminchlorid in einer Ausbeute von 80% der verwendeten Salpetersäure.

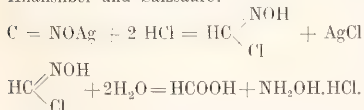
Sehr bequem läßt sich Hydroxylaminchlorid durch Hydrolyse des Hydroxylamindisulfosauren Kaliums darstellen. Läßt man eine abgekühlte Lösung von Natriumnitrit zu einer kalten Natriumbisulfitlösung tropfen, so daß die Temperatur 0° nicht übersteigt, so entsteht hydroxylamindisulfosaures Natrium



$$NaNO_2 + 2NaHSO_3 = HON(SO_3Na)_2 + NaOH$$

Auf Zusatz von Kaliumchlorid fällt das schwer lösliche hydroxylamindisulfosaure Kalium aus, welches beim Kochen mit Bariumchlorid Hydroxylaminchlorid liefert. Nach dem Abdampfen extrahiert man aus dem Salzrückstand das Hydroxylaminchlorid mit Alkohol.

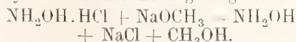
Ferner entsteht Hydroxylaminchlorid aus Knallsilber und Salzsäure:



$$C = NOAg + 2\ HCl = HC\begin{cases}NOH\\Cl\end{cases} + AgCl$$

$$HC\begin{cases}NOH\\Cl\end{cases} + 2H_2O = HCOOH + NH_2OH.HCl.$$

Freies Hydroxylamin wird aus Hydroxylaminchlorid und Natriummethylat in methylalkoholischer Lösung hergestellt



$$NH_2OH.HCl + NaOCH_3 = NH_2OH + NaCl + CH_3OH.$$

Nach Filtration des Kochsalzes wird die Hauptmenge Alkohol unter wenig vermindertem Druck abdestilliert und darauf der Rückstand unter stark vermindertem Druck fraktioniert. Die Destillation muß mit großer Vorsicht ausgeführt werden, da selbst bei kleinen Mengen Hydroxylamins und besonders gegen Ende der Destillation heftige Explosionen erfolgen können.

Bei gewöhnlicher Temperatur ist das Hydroxylamin fest. Es kristallisiert in Blättchen oder Nadeln, die bei 32 bis 33° schmelzen. Unter 22 mm Druck siedet es bei 56 bis 58°. Es ist hygroskopisch und löst sich in jedem Verhältnis in Wasser und auch in Methyl- und Aethylalkohol.

In reinem Zustande und in Flaschen aufbewahrt, die mit Säure gereinigt wurden, hält es sich ziemlich lange. An der Luft oxydiert es sich leicht unter Bildung von salpetrigen Dämpfen. In wässeriger Lösung zersetzt es sich bei Gegenwart von Alkali nach der Gleichung:



$$3NH_2OH = NH_3 + N_2 + 3H_2O$$

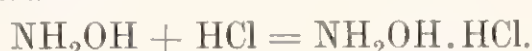
und zum Teil nach:



$$4NH_2OH = 2HN_3 + N_2O + 3H_2O.$$

Das Hydroxylamin ist eines der stärksten Reduktionsmittel. Das Reduktionspotential, gegen Wasserstoff gemessen, beträgt in basischer — 0,30 Volt, in saurer Lösung + 0,4 Volt. Gold-, Silber-, Quecksilber- und Kupfersalze werden leicht reduziert, ebenso Fehlingsche Lösung. Es vermag aber auch oxydierend zu wirken, z. B. wird Ferrohydroxyd zu Ferrihydroxyd oxydiert, wobei das Hydroxylamin in Ammoniak übergeht. Wässerige Lösungen von Hydroxylamin reagieren basisch. Obgleich eine genaue Bestimmung der Stärke des Hydroxylamins als Base wegen seiner Zersetzlichkeit nicht ausgeführt werden konnte, so folgt doch aus der geringen Lösungswärme, daß es eine schwächere Base ist als das Ammoniak. Dafür spricht auch, daß Hydroxylaminsalzlösungen deutlich sauer reagieren.

Mit Säuren vereinigt sich das Hydroxylamin, gleich dem Ammoniak, direkt ohne Wasseraustritt zu Salzen.



$$NH_2OH + HCl = NH_2OH.HCl.$$

Die Salze sind meist in Wasser löslich; schwer löslich ist das tertiäre Phosphat und Arsenat. Ferner sind Salze vom Typus $2NH_2OH.HAc$ bekannt z. B. das Dihydroxylaminchlorid $2NH_2OH.HCl$.

Aehnlich wie vom Ammoniak gibt es auch Verbindungen des Hydroxylamins mit Metallsalzen: $MgCl_2.2NH_2OH.2H_2O$; $CaCl_2.2HN_2OH$; $CoSO_4.NH_2OH.2H_2O$ u. a. Dagegen sind derartige Silber- und Kupfersalze wegen der reduzierenden Eigenschaften des Hydroxylamins nicht bekannt. Vom dreiwertigen Kobalt wurden u. a. Salze vom Typus $[Co(NH_2OH)_6]Ac_3$ hergestellt, welche sich wie die Salze der Luteoreihe $[Co(NH_3)_6].Ac_3$ verhalten.

Verbindungen des Stickstoffs mit den Halogenen. Während es nicht gelungen ist eine Verbindung des Stickstoffs mit Fluor oder Brom herzustellen, sind die Verbindungen mit Chlor und Jod schon lange bekannt und genau untersucht.

Chlorstickstoff NCl_3 wurde im Jahre 1811 von Dulong entdeckt. Er entsteht bei der Einwirkung von Chlor oder unterchloriger Säure auf eine konzentrierte, wässerige Ammonchloridlösung. Sehr bequem läßt sich Chlorstickstoff durch Elektrolyse einer solchen auf 30° erwärmten Lösung herstellen. Durch Mischen einer Ammonchloridlösung mit einer mit Salzsäure angesäuerten Chlorkalklösung und sanftes Durchschütteln mit Benzol erhält man eine Lösung des Chlorstickstoffs in Benzol, welche haltbar ist und ein relativ gefahrloses Arbeiten mit Chlorstickstoff gestattet.

Chlorstickstoff ist eine ölige, dunkelgelbe Flüssigkeit von spezifischem Gewicht 1,653, welche sich leicht verflüchtigt und die Schleimhäute stark angreift. Beim Erhitzen über 90°, durch Einwirkung des direkten Sonnenlichtes oder bei Berührung mit organischen Substanzen explodiert es ungemein heftig. In Wasser löst es sich ziemlich leicht, doch findet sehr bald eine Zersetzung in Stickstoff und Salzsäure statt.

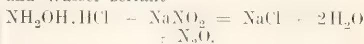
Jodstickstoff $NJ_3 . NH_3$. Die früher als Jodstickstoff NJ_3 angesehene Substanz, welche bei der Einwirkung von Jod auf konzentrierte wässerige Ammoniaklösung entsteht, ist eine Verbindung von Jodstickstoff mit Ammoniak. Es ist nicht gelungen, eine dem Chlorstickstoff entsprechende Verbindung NJ_3 herzustellen. Die Verbindung $NJ_3 . NH_3$ entsteht auch beim Behandeln wässeriger Ammoniaklösung mit alkoholischer Jodlösung oder mit einer Auflösung von Jod in Jodkalium. Die so erhaltene Verbindung hat je nach der Herstellung ein etwas verschiedenes Aussehen und explodiert in trockenem Zustande bei der leisesten Berührung mit festen Körpern außerordentlich heftig. Aus flüssigem Ammoniak und Jod werden grüne Kristalle von $NJ_3 3NH_3$ erhalten, welche im Vakuum bei —30° in gelbe Kristalle von $NJ_3 . 2NH_3$ übergehen, aus denen dann weiter bei 0° $NJ_3 . NH_3$ entsteht.

Jodazid, Triazojodid, N_3J, unterscheidet sich von den soeben beschriebenen Verbindungen durch eine hellgelbe Farbe, durch seine Löslichkeit in Wasser und organischen Lösungsmitteln und durch seinen stechenden, an Jodcyan erinnernden Geruch. Jodazid ist ein Derivat der Stickstoffwasserstoffsäure und entsteht beim Schütteln einer ätherischen Jodlösung mit Silberazid und Verdunsten des Aethers durch einen Luftstrom. Jodazid explodiert ebenfalls außerordentlich leicht unter Zerfall in die Elemente.

Verbindungen des Stickstoffs mit Sauerstoff.

Stickoxydul, Lachgas, $N \equiv N > O$ ist die sauerstoffärmste Verbindung des Stickstoffs. Es entsteht bei der Reduktion des Stickoxyds, der Salpetersäure, beim Zerfall der untersalpetrigen Säure und des Hydroxylaminnitrits usw. Dagegen ist es nicht gelungen das Stickoxydul aus den Elementen zu synthetisieren.

Zur Darstellung reinen Stickoxyduls läßt man eine konzentrierte, wässerige Natriumnitritlösung unter beständigem Abkühlen zu einer konzentrierten, salzsauren Lösung von Hydroxylamin langsam zutropfen. Aus beiden Salzen entsteht wohl zunächst Hydroxylaminnitrit, welches dann in Stickoxydul und Wasser zerfällt



$$NH_2OH . HCl + NaNO_2 = NaCl + 2 H_2O + N_2O.$$

Wird Ammonnitrat auf 170 bis 260° erhitzt, so zerfällt es in Stickoxydul und Wasser



$$NH_4NO_3 = N_2O + 2 H_2O.$$

Das so dargestellte Stickoxydul ist jedoch stets mit Stickstoff und Stickoxyd verunreinigt. Durch Waschen mit Ferrosulfatlösung läßt sich zwar das Stickoxyd entfernen, der Stickstoff dagegen nicht auf so einfache Weise. Außerdem muß man beim Erhitzen des Amonnitrats sehr vorsichtig sein, da sich die Zersetzung bei höherer Temperatur zu explosionsartiger Heftigkeit steigern kann. Besser verwendet man ein Gemisch äquivalenter Mengen von Natriumnitrat und Ammonsulfat.

Stickoxydul ist ein farbloses Gas von schwach süßlichem Geruch und Geschmack. Dichte = 1,5299 (auf Luft = 1 bezogen). Ein Liter wiegt bei 0° und 760 mm Druck 1,9772 g. Das Stickoxydul gehorcht nur bei sehr kleinen Drucken genau dem Boyle-Mariotteschen Gesetz. Bei 100° ist

$$c_p = 0{,}2212, \; c_v = 0{,}1738; \; \frac{c_p}{c_v} = 1{,}2724.$$

Stickoxydul läßt sich leicht kondensieren, bei 0° verdichtet es sich unter einem Druck von etwa 30 Atmosphären zu einer farblosen, leicht beweglichen Flüssigkeit, die unter Atmosphärendruck bei — 89,5° siedet. Die kritische Temperatur ist 35,4°, der kritische Druck 75 Atmosphären. Unter — 100° abgekühlt, erstarrt das flüssige Stickoxydul zu einer schneeartigen Masse oder zu farblosen Kristallen, die bei — 102,3° schmelzen. Gasförmiges Stickoxydul wird von Wasser, Alkohol, Petroleum und anderen organischen Lösungsmitteln leicht absorbiert. Die Abhängigkeit des Absorptionskoeffizienten für Wasser von der Temperatur ergibt sich aus $A = 1{,}3052 - 0{,}04536\, t - 0{,}000684\, t^2$. Die Löslichkeit des Stickoxyduls in Wasser wird durch Zusatz von Säuren, Basen oder Salzen verringert. Bemerkenwert ist, daß Kalilauge die Löslichkeit des Stickoxyduls stärker vermindert als Säuren oder Salze, ein Beweis dafür, daß es sich nicht wie ein Säureanhydrid verhält. In Alkohol löst sich etwa dreimal so viel Stickoxydul als in Wasser.

Beim Erhitzen auf 900° zerfällt das Stickoxydul fast vollständig in Stickstoff und Sauerstoff und ebenso beim Durchschlagen elektrischer Funken, hierbei können sich jedoch Stickstoff und Sauerstoff wieder zu Oxyden des Stickstoffs vereinigen. Wie schon erwähnt wurde, ist es nicht gelungen das Stickoxydul aus den Elementen herzustellen, während alle anderen Oxyde des Stickstoffs aus den Elementen erhalten werden können. Die Erklärung hierfür ist wohl darin zu suchen, daß das Stickoxydul die einzige Stickstoff-Sauerstoffverbindung ist, in welcher zwei Stickstoffatome miteinander verbunden sind.

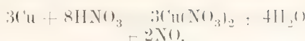
Stickoxydul gibt leicht an oxydierbare Substanzen Sauerstoff ab, besonders leicht dann, wenn bei der Oxydation der Stoffe viel Wärme frei wird, welche die Zersetzung des Stickoxyduls bewirkt. So explodiert ein Gemisch von Stickoxydul und Wasserstoff beim Durschschlagen elektrischer Funken und ebenso verpufft ein Gemenge von Stickoxydul mit Kohlenoxyd, Ammoniak, Phosphorwasserstoff, Schwefelwasserstoff usw. Phosphor verbrennt im Stickoxydul mit hell leuchtender Flamme, während brennender Schwefel darin erlischt, weil bei seiner Verbrennung nur wenig Wärme entwickelt wird. Mit Sauerstoff vereinigt sich Stickoxydul nicht, auch nicht bei Rotglut. Wird flüssiges Stickoxydul bei 0° im geschlossenen Rohr längere Zeit mit Wasser in Berührung gelassen, so bildet sich das Hydrat $N_2O.6H_2O$. Mit Stickoxydul gesättigtes Wasser enthält, wie sich durch Leitfähigkeitsmessungen nachweisen ließ, keine untersalpetrige Säure, als deren Anhydrid man es auffassen könnte.

Wird reines Stickoxydul längere Zeit eingeatmet, so verursacht es Ohrensausen, Bewußtlosigkeit und schließlich den Tod. Mit Sauerstoff gemischt eingeatmet, wirkt es ohne Schädigung der Gesundheit betäubend und es wurde deshalb früher als Anästhetikum in der Zahnheilkunde vielfach verwandt.

Stickoxyd, NO, ist das erste Produkt, welches bei der Vereinigung von Stickstoff mit Sauerstoff entsteht.

Es läßt sich darstellen aus sauerstoffreicheren Verbindungen, vor allem aus der Salpetersäure und der salpetrigen Säure durch Reduktion mit Kohle, Phosphor, schwefliger Säure, einigen Metallen oder Metallverbindungen. Besonders geeignet für die Darstellung ist die Reduktion der Salpetersäure mit Kupfer, Quecksilber oder Eisenchlorür und die Reduktion der salpetrigen Säure mit Ferrocyankalium.

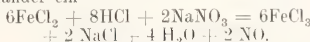
Beim Behandeln von Kupfer mit Salpetersäure vom spezifischen Gewicht 1,2 entsteht Stickoxyd nach der Gleichung



$$3Cu + 8HNO_3 = 3Cu(NO_3)_2 + 4H_2O + 2NO.$$

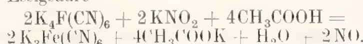
Zur Reinigung leitet man das Gas in kalte, konzentrierte Eisenchlorürlösung, welche es absorbiert, und treibt es dann durch Erwärmen der Lösung wieder aus.

Eisenchlorür, Natriumnitrat und Salzsäure wirken nach folgender Gleichung aufeinander ein



$$6FeCl_2 + 8HCl + 2NaNO_3 = 6FeCl_3 + 2NaCl + 4H_2O + 2NO.$$

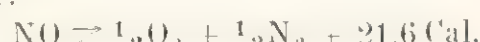
Sehr reines Stickoxyd entsteht beim Eintropfen einer Lösung von Ferrocyankalium und Kaliumnitrit in verdünnte Essigsäure



$$2K_4F(CN)_6 + 2KNO_2 + 4CH_3COOH = 2K_3Fe(CN)_6 + 4CH_3COOK + H_2O + 2NO.$$

Die Synthese des Stickoxyds aus Stickstoff und Sauerstoff ist für die Darstellung der Salpetersäure aus Luft und damit für die Verwertung des Luftstickstoffs von Bedeutung geworden. (Vgl. auch den Artikel „Stickstoffverwertung".)

In einem Gemisch von Stickstoff und Sauerstoff bilden sich bei hoher Temperatur (z. B. beim Durchschlagen elektrischer Funken) geringe Mengen von Stickoxyd und umgekehrt zerfällt das Stickoxyd fast vollständig in Stickstoff und Sauerstoff, wenn es hoch erhitzt wird. Die Bildung von höheren Oxyden des Stickstoffs ist in beiden Fällen auf die Vereinigung des zuerst entstandenen Stickoxyds mit Sauerstoff zurückzuführen. Es handelt sich also um das Gleichgewicht:



$$NO \rightleftarrows \tfrac{1}{2}O_2 + \tfrac{1}{2}N_2 + 21{,}6\ Cal.$$

Für konstante Temperatur gilt für die im Gleichgewicht befindlichen Mengen die einfache Beziehung

$$\frac{p_{NO}}{(p_{N_2})^{1/2} \cdot (p_{O_2})^{1/2}} = \text{konst.}$$

wenn mit p die entsprechenden Partialdrucke bezeichnet werden. Das Gleichgewicht verschiebt sich mit steigender Temperatur, wie bei allen endothermen Verbindungen, zugunsten des Stickoxyds und die Gleichgewichstkonstante nimmt mit steigender Temperatur immer höhere Werte an, wie folgende Zusammenstellung zeigt:

T (absolut)	$K.10^3$	% NO	
		berechnet	gefunden
1500	2,48	0,10	—
1811	9,16	0,35	0,37
2033	15,9	0,67	0,64
2195	24,2	0,98	0,97
2675	56,8	2,37	2,23
3200	117,9	4,43	ca. 5

Scheinbar im Widerspruch hiermit steht die Tatsache, daß sich das Stickoxyd bei niedriger Temperatur nicht in Stickstoff und Sauerstoff zersetzt. Dennoch ist es bei gewöhnlicher Temperatur im labilen Zustand und es zersetzt sich nur deshalb nicht in Stickstoff und Sauerstoff, weil die Geschwindigkeit dieses Zerfalls außerordentlich klein ist. Bei höherer Temperatur ist die Zerfallsgeschwindigkeit erheblich größer und der Gleichgewichtszustand wird schnell er-

reicht. Das gleiche gilt auch für die Bildungsgeschwindigkeit des Stickoxyds aus Stickstoff und Sauerstoff; sie ist bei hoher Temperatur sehr groß, bei niedriger außerordentlich klein.

Damit sich in Luft von Atmosphärendruck die Hälfte des theoretisch möglichen Stickoxyds bildet, sind bei den Temperaturen T folgende Zeiten erforderlich:

T (abs.)	Zeit	T (abs.)	Zeit
1000°	81,62 Jahre	2100°	5,06 Sek.
1500°	1,28 Tage	2500°	$1{,}06 \cdot 10^{-2}$ Sek.
1900°	2,08 Min.	2900°	$3{,}45 \cdot 10^{-5}$ „

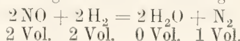
Es ist demnach möglich, das bei sehr hoher Temperatur gebildete Stickoxyd durch schnelles Abkühlen der Gase zu erhalten.

Stickoxyd ist ein farbloses Gas von der Dichte 1,0380 (bezogen auf Luft). Ein Liter wiegt bei 0° und 760 mm Druck 1,3402 g. Es gehört zu den schwer kompressiblen Gasen. Durch starkes Abkühlen verdichtet es sich zu einer farblosen Flüssigkeit, die unter Atmosphärendruck bei — 153,6° siedet. Kritische Temperatur = — 93,5°, kritischer Druck 71,2 Atmosphären. Bei — 167° erstarrt das Stickoxyd zu einer schneeartigen Masse. $c_p = 0{,}23175$, $\frac{c_p}{c_v} = 1{,}40$. In Wasser ist es nur wenig löslich, 1 ccm absorbiert bei 0° 0,07381, bei 50° 0,03152 ccm.

Von den verschiedensten Reduktionsmitteln wird das Stickoxyd leicht angegriffen. Wasserstoff reduziert nur bei Gegenwart von katalytisch wirkenden Substanzen, wie Platin oder fein verteiltem Nickel, zu Stickstoff bezw. Ammoniak. Während lebhaft brennender Phosphor im Stickoxyd weiter brennt und es zu Stickstoff reduziert, verlischt brennender Schwefel darin. Zinnchlorür und Chromosalze reduzieren in saurer Lösung zu Hydroxylamin, in alkalischer zu Ammoniak. Mit Sauerstoff vereinigt es sich zu Stickstoffdioxyd, bei sehr tiefer Temperatur dagegen zu Stickstofftrioxyd N_2O_3. Durch Oxydationsmittel wie Wasserstoffsuperoxyd, Bleisuperoxyd, Kaliumpermanganat wird Stickoxyd in salpetrige Säure bezw. in Nitrite oder in Salpetersäure bezw. in Nitrate übergeführt. Mit Chlor verbindet sich das Stickoxyd zu einem orangegelben Gas, welches sich bei — 20° zu einer braunroten Flüssigkeit verdichtet. Wahrscheinlich besteht dieselbe aus einem Gemenge von Nitrosylchlorid und Chlor.

Additionelle Verbindungen. Stickoxyd verbindet sich mit verschiedenen Säuren und Salzen zu allerdings wenig beständigen Verbindungen. Am bekanntesten ist die Absorption des Stickoxyds durch wässerige Ferrosalzlösungen. Die von Ferrosulfat absorbierte Menge Stickoxyd, welche vom Druck und von der Temperatur abhängig ist, entspricht bei gewöhnlichem Druck zwischen 8 bis 25° ungefähr der Verbindung $2FeSO_4.NO$. Außerdem kennt man Verbindungen wie $BiCl_3.NO$; $Fe_2Cl_6.NO$; Salze der Nitroprussidreihe von der Formel $Me_2[Fe(CN)_5.NO]$ und Nitrosoverbindungen des Kobalts, die in isomeren Formen auftreten z. B. $[Co(NH_3)_5NO]Cl_2$ usw.

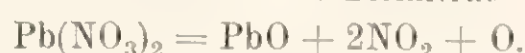
Qualitativ läßt sich das Stickoxyd leicht nachweisen durch die bei der Absorption durch Ferrosalzlösung auftretende schwarzbraune Färbung oder die Bildung des rotbraunen Stickstoffdioxyds bei Luftzufuhr. Quantitativ bestimmt man es aus der Volumkontraktion, die beim Verbrennen des Stickoxyds mit Wasserstoff eintritt. Wird ein Gemisch von Stickoxyd mit überschüssigem Wasserstoff durch eine erhitzte Drehschmidtsche Platinkapillare geleitet, so verbrennt es gemäß der Gleichung



$$2\,NO + 2\,H_2 = 2\,H_2O + N_2$$
2 Vol. 2 Vol. 0 Vol. 1 Vol.

$^2/_3$ der eingetretenen Kontraktion entsprechen dem vorhandenen Stickoxyd.

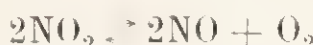
Stickstoffdioxyd, Untersalpetersäure, NO_2. Durch Aufnahme von Sauerstoff geht das Stickoxyd in Stickstoffdioxyd über, welches sich bei tieferer Temperatur zum Stickstofftetroxyd, N_2O_4, polymerisiert. Das bei mittlerer Temperatur vorliegende Gemenge von Stickstoffdioxyd und Stickstofftetroxyd nennt man gewöhnlich Untersalpetersäure. Wird ein vollkommen trockenes Gemisch von einem Volumen Sauerstoff und zwei Volumen Stickoxyd zuerst durch eine mit Porzellanstücken gefüllte und dann durch eine auf — 20° abgekühlte U-förmig gebogene Röhre geleitet, so entsteht in dieser festes, farbloses Stickstofftetroxyd N_2O_4. Sind die Gase nicht vollständig trocken, so entsteht eine gelbliche Flüssigkeit. Auch Stickstofftrioxyd, N_2O_3, wird durch Einleiten von Sauerstoff in N_2O_4 übergeführt. Rote rauchende Salpetersäure liefert bei der Destillation ebenfalls Untersalpetersäure. Sehr bequem erhält man dieselbe durch Erhitzen von Bleinitrat



$$Pb(NO_3)_2 = PbO + 2NO_2 + O.$$

Die farblosen Kristalle von Stickstofftetroxyd schmelzen zwischen —10° bis —11° zu einer gelblichen Flüssigkeit, welche bei + 36° siedet und bei 0° die Dichte 1,4935 hat. Mit steigender Temperatur wird die Farbe immer mehr rotbraun, infolge der eintretenden Dissoziation des farblosen Tetroxydes in rotbraun gefärbtes Dioxyd: $N_2O_4 \rightleftarrows 2\,NO_2$. Da durch die Dissoziation eine Volumvergrößerung eintritt, so läßt sich durch Messung der Dampfdichte der Grad der Dissoziation bei gegebener Temperatur bestimmen und man hat so gefunden, daß bei 64° und Atmosphärendruck die Hälfte

des Stickstofftetroxyds in Stickstoffdioxyd dissoziiert ist und daß bei 150° die Dissoziation vollständig ist. Ueber 150° erhitzt, dissoziiert dann weiter das Stickstoffdioxyd in Stickoxyd und Sauerstoff:



$$2NO_2 \rightarrow 2NO + O_2$$

und bei 620° ist das Stickstoffdioxyd praktisch vollständig in Stickoxyd und Sauerstoff zerfallen. Flüssiges, in Eisessig gelöstes Stickstofftetroxyd ist nicht dissoziiert, wie durch Bestimmung der Gefrierpunktserniedrigung festgestellt wurde.

Die Lichtabsorption, welche durch die Stickstoffdioxyd-Moleküle verursacht wird, kann ebenso wie die Dampfdichtebestimmung zur Bestimmung des Dissoziationsgrades benutzt werden.

Flüssiges Stickstofftetroxyd leitet den elektrischen Strom sehr schlecht, oberhalb 60° ist es ein vollkommener Nichtleiter.

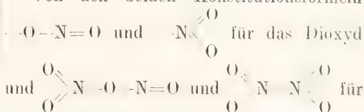
Untersalpetersäure ist ein starkes Oxydationsmitel. Kohle, Phosphor und Schwefel verbrennen im Dampf derselben; Kohlenoxyd wird bei gewöhnlicher Temperatur zu Kohlendioxyd; Schwefelwasserstoff zu Wasser und Schwefel oxydiert. Wird Stickstofftetroxyd mit überschüssigem Wasserstoff über Platin oder fein verteiltes Nickel oder Kupfer geleitet, so wird es zu Ammoniak reduziert. Kalium und Natrium verbrennen im Untersalpetersäuredampf, andere Metalle z. B. Eisen, Zinn werden bei höherer Temperatur oxydiert. Gegen trockenen Sauerstoff ist N_2O_4 vollkommen indifferent, bei Anwesenheit von Wasser wird es zu Salpetersäure oxydiert. Ozon gibt mit N_2O_4 Stickstoffpentoxyd N_2O_5. Aus flüssigem Stickstofftetroxyd entsteht durch Wasser eine bei guter Kühlung haltbare Flüssigkeit, die salpetrige Säure und Salpetersäure enthält. $N_2O_4 + H_2O = HNO_3 + HNO_2$.

Beim Erwärmen der Flüssigkeit zersetzt sich die salpetrige Säure in Wasser, Stickoxyd und Salpetersäure. Wässerige Alkalien werden, unter Entwickelung von wenig Stickoxyd, in Nitrate und Nitrite übergeführt. Konzentrierte Schwefelsäure löst Stickstofftetroxyd ohne Färbung.

Additionelle Verbindungen. Während einige Metalle durch flüssiges Stickstofftetroxyd unter Entwicklung von Stickoxyd in Nitrite verwandelt werden, geben andere Metalle z. B. Kupfer, Nickel, Kobalt, Eisen, mit flüssigem Stickstofftetroxyd sogenannte Nitrometalle: Cu_2NO_2, Co_2NO_2, Ni_2NO_2, welche beim Erwärmen in die Komponenten zerfallen. Mit verschiedenen Metallsalzen entstehen ebenfalls additionelle Verbindungen z. B. $BiCl_2 . NO_2$, $FeCl_3NO_2$, $SnCl_4NO_2$ usw.

Als Lösungsmittel wirkt das flüssige Stickstofftetroxyd assoziierend. Viele organische Substanzen lösen sich darin auf, dagegen sind anorganische Salze darin unlöslich.

Von den beiden Konstitutionsformeln



–O–N=O und N(=O)(–O) für das Dioxyd und (O)(O)N–O–N=O und (O)(O)N–N(O)(O) für das Tetroxyd entsprechen die ersteren den verschiedenen Reaktionen am besten.

Stickstofftrioxyd, Salpetrigsäureanhydrid, N_2O_3, entsteht beim Mischen von 1 Vol. Stickoxyd mit 1 Vol. Stickstoffdioxyd, oder durch Einleiten von Stickoxyd in flüssiges Stickstofftetroxyd. Auch durch Zersetzen der Bleikammerkristalle kann es erhalten werden. Am bequemsten stellt man es durch Erwärmen von Salpetersäure (spez. Gew. 1,35) mit arseniger Säure oder Stärkemehl dar.

Stickstofftrioxyd ist bei —21° eine tief dunkelblaue Flüssigkeit, die bei —103° zu einer blauen Kristallmasse erstarrt. Die Flüssigkeit, deren Dichte bei 0° = 1,449 ist, hat keinen bestimmten Siedepunkt und besteht bei nicht allzu tiefen Temperaturen aus einem Gemenge von Stickstofftrioxyd, Stickstoffdioxyd und Stickoxyd. Bei gewöhnlicher Temperatur ist das Stickstofftrioxyd nicht existenzfähig, es dissoziiert vielmehr in Stickoxyd und Stickstoffdioxyd. Infolgedessen ist es braun gefärbt und gibt dasselbe Absorptionsspektrum wie das Stickstoffdioxyd. Mit flüssigem Stickstofftetroxyd mischt sich das flüssige Trioxyd in jedem Verhältnis.

Durch Sauerstoff wird flüssiges Stickstofftrioxyd in Stickstofftetroxyd übergeführt, wenn die Temperatur höher als —100° ist. Bei Oxydation verhält es sich wie ein Gemenge von Stickoxyd und Stickstoffdioxyd. Von konzentrierter Schwefelsäure wird es unter Bildung von Nitroxylschwefelsäure gelöst.

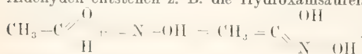
Mit Wasser entsteht in der Kälte eine schwach blaue Flüssigkeit, die sich oberhalb 0° und bei größerer Konzentration unter Entwickelung von Stickoxyd zersetzt.

Man nimmt für das Stickstofftrioxyd die Strukturformel O=N—O—N=O an.

Stickstoffpentoxyd, N_2O_5. Konstitutionsformel: (O)(O)N—O—N(O)(O). Es ist das Anhydrid der Salpetersäure und zugleich das sauerstoffreichste Oxyd des Stickstoffs. Es entsteht, wenn man 100prozentige, von Stickoxyden freie Salpetersäure unter guter Kühlung so lange mit Phosphorpentoxyd versetzt, bis dieses in der dick gewordenen Flüssigkeit ungelöst bleibt und dann destilliert. Von dem aus zwei Schichten bestehen-

den Destillat trennt man die spezifisch leichtere, welche das Stickstoffpentoxyd enthält, bringt sie durch Abkühlen zum Erstarren und preßt das Stickstoffpentoxyd von der Mutterlauge ab. Durch nochmaliges Umschmelzen wird es gereinigt. Es bildet farblose, hygroskopische rhombische Kristalle die bei 29 bis 30° schmelzen. Es siedet zwischen 45° und 50°, zersetzt sich aber dabei. Unterhalb +8° und im zerstreuten Licht ist es einige Zeit haltbar, bei höherer Temperatur zersetzt es sich in Stickstoffdioxyd und Sauerstoff. Mit Wasser bildet es unter starker Wärmeentwickelung Salpetersäure. Die meisten Metalle werden vom Stickstoffpentoxyd nicht angegriffen; Kalium und Natrium verbrennen dagegen mit großem Glanze darin. Auf viele organische Substanzen wirkt es heftig ein.

Nitroxyl, = N—O—H. Es ist bis jetzt nicht gelungen, diese Verbindung zu isolieren, doch ließ sich ihr vorübergehendes Auftreten in Lösungen nachweisen, Nitroxyl entsteht u. a. bei der Oxydation von Hydroxylamin mit Caroscher Säure oder aus Salzen der Nitrohydroxylaminsäure durch Spaltung mit Alkalien. In Lösung polymerisiert es sich schnell zu untersalpetriger Säure, doch können Derivate des Nitroxyls dadurch erhalten werden, daß man Substanzen hinzufügt, die sich mit dem Nitroxyl sofort nach seiner Entstehung verbinden. Bei Zusatz von Aldehyden entstehen z. B. die Hydroxamsäuren



$$CH_3-C{\overset{O}{\underset{H}{\diagup\!\!\diagup}}} + = N-OH = CH_3 = C{\overset{OH}{\underset{N-OH}{}}} .$$

Sauerstoffsäuren des Stickstoffs.

Untersalpetrige Säure $H_2O_2N_2$. In der Reihe der Oxydationsprodukte, die vom Ammoniak zur Salpetersäure führt, steht die untersalpetrige Säure zwischen dem Hydroxylamin und der salpetrigen Säure. Sie kann also durch Oxydation des Hydroxylamins (mittels Quecksilberoxyd) oder durch Reduktion der salpetrigen Säure und der Salpetersäure erhalten werden. Zur Darstellung eignet sich am besten die Reduktion von Alkalinitrit oder Alkalinitrat mit flüssigem (1 prozentigem) Natriumamalgam bei niedriger Temperatur und Verwendung eines Ueberschusses von Nitrit. Bei dieser Reduktion entsteht stets auch Hydroxylamin. Nach beendeter Reduktion wird mit Salpetersäure fast neutralisiert und das Hydroxylamin durch Kochen mit Quecksilberoxyd zerstört, worauf mit Salpetersäure vollständig neutralisiert und mit Silbernitrat die untersalpetrige Säure als Silbersalz $Ag_2N_2O_2$ gefällt wird.

Ferner entsteht untersalpetrige Säure bei der Einwirkung von salpetriger Säure auf Hydroxylamin bezw. von Silbernitrit auf Hydroxylaminchlorhydrat $HO-NO + H_2NOH = HON = NOH + H_2O$, eine für die Konstitutionsbestimmung wichtige Bildungsweise. Auch entsteht die Säure bei der Spaltung von Oxamidoverbindungen in alkalischer Lösung, wobei das zuerst entstehende Nitroxyl sich sofort zu untersalpetriger Säure polymerisiert. So geht Hydroxylaminmonosulfosaures Natrium in alkalischer Lösung vollständig in Sulfit und Hyponitrit über. $2HONHSO_3Na + 4NaOH = Na_2N_2O_2 + 2Na_2SO_3$.

Zur Darstellung der freien Säure setzt man zu ätherischer Salzsäure das durch wiederholtes Lösen in Salpetersäure und Ausfällen mit Soda gereinigte Silbersalz im geringen Ueberschuß, filtriert und verdunstet im Vakuum unter Ausschluß von Wasser.

Untersalpetrige Säure bildet weiße Kristallblättchen, die außerordentlich explosiv sind. Sie löst sich leicht in Aether, Chloroform und Benzol. In wässeriger Lösung ist sie nur wenig dissoziiert und leitet deshalb den elektrischen Strom schlecht. Die untersalpetrige Säure ist etwa so stark wie die Kohlensäure und wie diese zweibasisch. Die wässerige Lösung ist beständiger als die Säure, doch zersetzt sie sich leicht bei Gegenwart von Säuren oder wenig Alkali und zwar hauptsächlich in Stickoxydul und Wasser. Es tritt deshalb bei vielen Reaktionen, bei denen man die Bildung von untersalpetriger Säure erwarten sollte, Stickoxydul auf. Umgekehrt läßt sich jedoch die Säure nicht aus Stickoxydul und Wasser herstellen. Gegen Reduktionsmittel ist sie ziemlich beständig, durch Brom und Kaliumpermanganat wird sie leicht zu Salpetersäure oxydiert. Sie bildet als zweibasische Säure zwei Reihen von Salzen: neutrale $Me^{I}_2N_2O_2$ und saure $Me^{I}HN_2O_2$. Die sauren Salze sind außerordentlich leicht zersetzlich, es konnte nur das saure Ammoniumsalz rein hergestellt werden. Die neutralen Salze sind in Wasser schwer löslich, ausgenommen die Alkalisalze.

Ihren Bildungsweisen und Umsetzungen entsprechend, gibt man der Säure die Konstitutionsformel HON = NOH.

Nitrohydroxylaminsäure,

$$HO-N=N{\overset{O}{\underset{OH}{\diagup\!\!\diagup}}} ,$$

bezw. ihr Natriumsalz, $Na_2N_2O_3$, entsteht bei Gegenwart von Natronlauge durch Einwirkung von Salpetersäureestern auf alkoholische Hydroxylaminlösung. Die freie Säure ist nicht bekannt. Das in Wasser leicht lösliche Natriumsalz zersetzt sich leicht in salpetrige Säure und Nitroxyl, welch letzteres sich zu untersalpetriger Säure polymerisiert. Die untersalpetrige Säure kann dann weiter in Stickoxydul und Wasser zerfallen. Setzt man zu der Lösung einen Aldehyd, so bildet dieser mit dem entstehenden Nitroxyl Hydroxamsäure $R-C{\overset{OH}{\underset{N-OH}{}}}$. Auch das Kaliumsalz ist in Wasser leicht löslich. Schwer löslich sind die Erdalkalisalze: $CaN_2O_3 . 3\frac{1}{2}H_2O$, $SrN_2O_3 . 1\frac{1}{2}H_2O$ und $BaN_2O_3 . H_2O$.

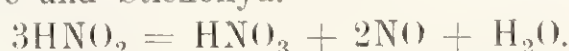
Salpetrige Säure, HNO_2, ist nur in Lösung existenzfähig, sie bildet aber sehr beständige Salze, die Nitrite. Von diesen kommt das Ammoniumnitrit in geringer Menge in der Luft vor, wo es sich aus dem durch elektrische Entladungen entstandenen Stickoxyd, aus Sauerstoff und aus Ammoniak bildet. Auch im Ackerboden kommen Nitrite vor, die dort u. a. bei der Lebenstätigkeit gewisser Bakterien teils durch Oxydation des Ammoniaks teils durch Reduk-

tion der Nitrate entstehen. Deshalb können geringe Mengen salpetriger Säure normaler Weise im Trinkwasser enthalten sein, das Vorkommen größerer Mengen deutet jedoch auf Verunreinigungen oder Fäulnisprozesse hin, durch die das Wasser gesundheitsschädlich wird.

Künstlich werden Alkalinitrite in großen Mengen hergestellt, da sie vor allem zur Herstellung von Azofarbstoffen gebraucht werden.

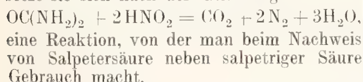
Wie schon erwähnt wurde, entsteht salpetrige Säure bei der Einwirkung von Wasser auf Stickstofftrioxyd und auf Untersalpetersäure. Auch durch Reduktion der Salpetersäure und Oxydation von Ammoniak wird salpetrige Säure erhalten.

Die wässerige Lösung leitet den elektrischen Strom und man fand aus dem molekularen Leitvermögen der Säure und des Natriumsalzes für die Beweglichkeit des Nitritions NO_2' den Wert 64,5 und für die Dissoziationskonstante 0,00040. Die salpetrige Säure ist etwa 20mal so stark wie Essigsäure. Die wässerige Lösung ist nur bei 0° einigermaßen beständig, beim Erwärmen zersetzt sie sich unter Bildung von Salpetersäure und Stickoxyd.



$$3HNO_2 = HNO_3 + 2NO + H_2O.$$

Diese Zersetzung wird auch in der Kälte durch indifferente, scharfkantige Stoffe wie Sand, Glassplitter, Gips usw. verursacht. Die salpetrige Säure kann reduzierend und oxydierend wirken. Durch Ozon, Wasserstoffsuperoxyd, Braunstein, Chlorsäure, Uebermangansäure wird sie zu Salpetersäure oxydiert, wirkt also auf diese Stoffe reduzierend, dagegen oxydiert sie Stoffe wie Zinnchlorür, Schwefelwasserstoff, schweflige Säure usw., wobei je nach den Bedingungen verschiedene sauerstoffärmere Verbindungen des Stickstoffs entstehen oder die Reduktion der salpetrigen Säure bis zum Stickstoff oder Ammoniak führt. Mit Harnstoff zersetzt sie sich nach der Gleichung



$$OC(NH_2)_2 + 2HNO_2 = CO_2 + 2N_2 + 3H_2O,$$

eine Reaktion, von der man beim Nachweis von Salpetersäure neben salpetriger Säure Gebrauch macht.

Nitrite entstehen beim Schmelzen von Nitraten für sich oder besser mit Zusatz von Blei, Kupfer usw. Auch durch elektrolytische Reduktion können Nitrite aus Nitraten hergestellt werden. Bariumnitrit entsteht leicht aus nitrosen Gasen und Baryt neben Bariumnitrat, von dem es durch Umkristallisieren getrennt wird. Die Nitrite sind meist schwach gelb gefärbt und mit Ausnahme des Silbersalzes in Wasser leicht löslich. In wässeriger Lösung zersetzen sie sich allmählich derart, daß das Nitrition eine negative elektrische Ladung abgibt und in Nitration und Stickoxyd übergeht entsprechend: $2NO_2' = NO_3' + NO$. Nitrite der Edelmetalle zersetzen sich demnach unter Bildung von Nitrat, Stickoxyd und Abscheidung von Metall, da dem Metallion die positive Ladung entzogen wird z. B. $2Ag^{\cdot} + 2NO_2' = Ag^{\cdot} + NO_3' + NO + Ag$. Die Lösungen von Nitriten unedlerer Metalle nehmen entweder basische Reaktion an oder scheiden eventuell unlösliche basische Nitrite oder auch Hydroxyde ab, weil den in der Lösung vorhandenen Wasserstoffionen die positive Ladung entzogen wird z. B. $4Na^{\cdot} + 4NO_2' + 2H^{\cdot} + 2OH' = 4Na^{\cdot} + 2NO_3' + 2OH' + 2NO + H_2$.

Allgemein schreibt man jetzt der salpetrigen Säure die Konstitution $O = N - OH$ bezw. den gelösten Nitriten $O = NOMe^{I}_{1}$ zu, wenngleich auch die Formel $\begin{matrix}O\\O\end{matrix}\!\!\gg N{-}H$, bezw. $\begin{matrix}O\\O\end{matrix}\!\!\gg N{-}Me^{I}$, mehrfach verteidigt worden ist. Möglicherweise sind die Nitrite in festem Zustand Gemische beider Arten, da z. B. festes Silbernitrit mit Jodalkylen Alkylnitrite und auch Nitroverbindungen bildet.

Durch Ersatz des Hydroxyls der salpetrigen Säure gelangt man zu den

Halogenderivaten der salpetrigen Säure.

Nitrosylfluorid, NOF, entsteht aus Fluorsilber und Nitrosylchlorid bei 200 bis 250°. Es ist ein farbloses Gas, das sich zu einer bei —50° siedenden Flüssigkeit verdichten läßt. Bei —134° erstarrt dieselbe zu einer festen Masse.

Nitrosylchlorid, NOCl, bildet sich durch direkte Vereinigung von Stickoxyd mit Chlor. Es ist im Königswasser enthalten und kann auch durch Destillation desselben erhalten werden. Sehr bequem läßt es sich darstellen durch Erwärmen von Nitrosylschwefelsäure und Kochsalz auf 85°.

Bei gewöhnlicher Temperatur ist es gasförmig. Es läßt sich zu einer roten, bei —5,6° siedenden Flüssigkeit verdichten, welche bei weiterem Abkühlen zu einer festen, gelben, bei —65° schmelzenden Masse erstarrt. Auch bei höherer Temperatur ist es ziemlich beständig, erst bei etwa 700° beginnt die Dissoziation. Von Wasser wird es, wie alle Säurechloride, vollständig zersetzt. Sehr viele Metalle werden teils in der Kälte, teils bei höherer Temperatur von Nitrosylchlorid angegriffen.

Nitrosylbromid, NOBr, entsteht beim Einleiten von Stickoxyd in auf —15° abgekühltes Brom oder beim Erwärmen von Natriumbromid mit Nitrosylschwefelsäure.

Es ist eine schwarzbraune Flüssigkeit, die nur bei tieferen Temperaturen beständig ist und schon beim Sieden (Kp. —2°) teilweise in Stickoxyd und Brom zerfällt. Von Wasser wird es, wie das Nitrosylchlorid, zersetzt unter Bildung von Bromwasserstoffsäure und salpetriger Säure.

Salpetersäure, HNO_3. Die freie Säure kommt in der Natur nicht vor, wohl aber sind einige ihrer Salze, wie Kaliumnitrat, Natriumnitrat, weit verbreitet. Wegen der Löslichkeit der Nitrate und weil sie leicht reduziert werden können, findet man größere Mengen nur an wenigen Orten. Mächtige Lager von Natriumnitrat (Chilesalpeter) befinden sich an der regenarmen Westküste von Südamerika in der Wüste Atakama. Diese Lager decken bis heute den Bedarf fast der ganzen Welt. Ferner befindet sich ein großes Lager salpeterhaltiger Erde (mit ca. 3 % Nitrat) in Mittelasien im Chanat von Chiva. Auch die Pflanzen enthalten Nitrate, welche sie aus dem Boden aufnehmen und zu stickstoffhaltigen organischen Substanzen verarbeiten.

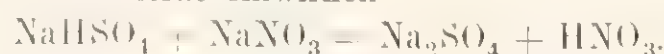
Von den mannigfaltigen Bildungsweisen der Salpetersäure, welche bei Anwesenheit von Wasser durch geeignete Oxydation aus fast allen stickstoffhaltigen Substanzen zu erhalten ist, hat die biologische für die Entstehung der Nitrate im Ackerboden und damit für den Kreislauf des Stickstoffs in der Natur eine große Bedeutung. Die Oxydation des bei der Verwesung organischer Substanzen oder aus tierischen Abgängen entstehenden Ammoniaks wird nämlich durch gewisse, sogenannte „nitrifizierende" Bakterien bewirkt. Zwei durchaus verschiedene Arten von Bakterien, deren Reinkulturen man hergestellt hat, sind hierbei tätig. Die eine Art oxydiert das Ammoniak zu salpetriger Säure bezw. zu Nitrit und die andere führt die entstandenen Nitrite in Nitrate über.

Darstellung der Salpetersäure. Im Laboratorium wie in der Technik wird Salpetersäure aus Natriumnitrat und Schwefelsäure hergestellt. Bei gewöhnlicher Temperatur erfolgt die Zersetzung nach der Gleichung



$$NaNO_3 + H_2SO_4 = NaHSO_4 + HNO_3$$

auch bei einem Ueberschuß von Natriumnitrat. Erst bei höherer Temperatur, bei der sich dann ein Teil der Salpetersäure in Stickstoffdioxyd, Sauerstoff und Wasser zersetzt, kann das Natriumbisulfat ebenfalls auf Natriumnitrat einwirken



$$NaHSO_4 + NaNO_3 = Na_2SO_4 + HNO_3.$$

Auch die aus äquimolekularen Mengen von Nitrat und Schwefelsäure dargestellte Salpetersäure enthält geringe Mengen Stickstoffdioxyd und ist infolgedessen schwach gelblich gefärbt, auch ist sie wasserhaltig. Eine fast reine Säure erhält man durch Destillation im Vakuum. Ganz reine, absolute Salpetersäure läßt sich bei tiefer Temperatur durch fraktioniertes Ausfrieren aus einer 98 prozentigen Säure darstellen. Sie bildet schneeweiße, bei −41.3° zu einer schwach gelblichen Flüssigkeit schmelzende Kristalle. Hierbei tritt schon eine geringe Zersetzung ein und die bei gewöhnlicher Temperatur allmählich farblos werdende Säure ist nach einiger Zeit nur noch 98,6 prozentig. Diese 98 prozentige Säure raucht stark an der Luft. Destilliert man eine verdünnte, wässerige Lösung, so geht zunächst fast nur Wasser über. Die Siedetemperatur steigt allmählich und zwischen 120 bis 121° destilliert eine Lösung die 68 % Salpetersäure enthält und das spezifische Gewicht 1,414 hat. Dieses ist die gewöhnliche konzentrierte Salpetersäure des Handels.

Die Salpetersäure mischt sich in jedem Verhältnis mit Wasser. Sie bildet mit Wasser zwei isolierbare feste Hydrate $HNO_3.H_2O$ und $NHO_3.3H_2O$. Diese Hydrate scheinen auch in wässerigen Lösungen zu existieren, was sowohl aus Leitfähigkeitsmessungen wässeriger Lösungen als auch aus Messungen der Volumänderung verschieden konzentrierter Lösungen hervorgeht.

Prozentgehalt und Dichte (d_4^{15}) wässeriger Salpetersäure (nach Lunge).

d_4^{15}	% HNO_3	d_4^{15}	% HNO_3
1,00	0,10	1,30	47,49
1,05	8,99	1,35	55,79
1,10	17,11	1,40	65,30
1,15	24,84	1,45	77,28
1,20	32,36	1,50	94,09
1,25	39,82	1,52	99,67

Folgende Tabelle gibt die Aequivalentleitfähigkeiten (Λ) bei 18° von Lösungen, die in v Litern ein Mol Salpetersäure enthalten.

v	Λ	v	Λ
0,1	65,4	10	350
0,2	156	20	357
0,5	258	50	364
1,0	310	100	368
2	324	200	371
5	340	500	374
		1000	375

Hieraus ist zu ersehen, daß die Salpetersäure in verdünnten Lösungen weitgehend dissoziiert ist; in einer $^1/_{10}$ normalen Lösung schon zu 93,3 %. In der Tat ist die Salpetersäure eine der stärksten aller bekannten Säuren, was aus den Untersuchungen über die Verseifung von Methylacetat durch Salpetersäure, die Inversion von Rohrzucker und den Gefrierpunktsbestimmungen übereinstimmend hervorgeht.

Die Wanderungsgeschwindigkeit des Nitrations NO_3' ist bei 18° = 61.8. Bei konzentrierteren Lösungen steigt die „spezifische" Leitfähigkeit zunächst bis zu einem Maximalwert an, um dann bis zu dem Wert $152,5.10^{-4}$ für ganz konzentrierte Lösungen zu sinken. Dieses Verhalten erklärt sich aus der Zunahme der Zähigkeit der Lösungen und der dadurch bedingten Abnahme der Wanderungsge-

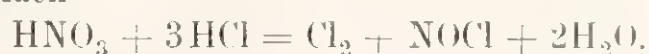
schwindigkeiten der Wasserstoff- und der Nitrationen.

Salpetersäure wirkt stark oxydierend auf die verschiedensten Elemente und Verbindungen ein, wobei sie selbst zu Stickstoffdioxyd, Stickoxyd, Stickoxydul, untersalpetriger Säure, Hydroxylamin, Stickstoff oder Ammoniak reduziert werden kann. So verbrennt rotglühende Kohle lebhaft in der konzentrierten Säure, Schwefel wird zu Schwefelsäure, Phosphor zu Phosphorsäure oxydiert; organische Substanzen werden, mit konzentrierter Salpetersäure im zugeschmolzenen Rohr erhitzt, glatt zu Kohlendioxyd und Wasser verbrannt. Hiervon macht man Gebrauch bei der Halogen-, Schwefel- und Phosphorbestimmung in organischen Substanzen. (Methode von Dumas.) Sämtliche Metalle, mit Ausnahme von Gold, Platin, Rhodium und Iridium, werden von der Säure angegriffen. Da sich mittels Salpetersäure Silber von Gold trennen läßt, so nannte man sie früher auch Scheidewasser. Bei der Einwirkung von Salpetersäure auf Metalle wird die Säure selbst reduziert und zwar durch unedlere Metalle weiter als durch edlere. So reduzieren Quecksilber, Silber, Kupfer die Säure bis zum Stickoxyd; Zinn, Eisen, Zink, Magnesium bis zum Hydroxylamin oder Ammoniak.

Rote rauchende Salpetersäure entsteht bei der Destillation von zwei Mol Salpeter mit einem Mol Schwefelsäure, oder durch Einleiten von Stickoxyd oder Stickstoffdioxyd in konzentrierte, 98 prozentige Salpetersäure. Die so entstandene Säure raucht an der Luft, wirkt stark ätzend und ist ein außerordentlich kräftiges Oxydationsmittel. Sie enthält, einerlei auf welche Weise sie dargestellt wurde, nur Stickstoffdioxyd. Beim Verdünnen mit Wasser wird die Säure zunächst grün, dann blau und endlich farblos. Diese Farbenänderung wird durch die Bildung von Stickstofftrioxyd aus Untersalpetersäure und Wasser verursacht, so daß die grüne Farbe als Mischfarbe des braunen, unveränderten Stickstoffdioxyds mit dem gebildeten blauen Stickstofftrioxyd entsteht. Konzentrierte Salpetersäure kann bis zu 50% ihres Gewichtes an Untersalpetersäure aufnehmen. Je höher der Gehalt an Untersalpetersäure, um so höher wird ihr spezifisches Gewicht.

% N_2O_4	% HNO_3 (vom spez. Gew. 1,496)	Spez. Gew.
1,04	98,96	1,4986
5,81	94,19	1,5199
12,70	87,30	1,5445

Königswasser nennt man ein Gemisch von einem Teil Salpetersäure (spez. Gewicht 1,2) mit drei Teilen Salzsäure (spez. Gewicht 1,12). Den Namen erhielt es von dem Alchemisten Basilius Valentinus, weil es Gold, den König der Metalle auflöst. Königswasser ist eine gelbrote Flüssigkeit von intensivem Geruch und stark oxydierender Wirkung, die darauf beruht, daß sich in der Flüssigkeit freies Chlor und Nitrosylchlorid bilden

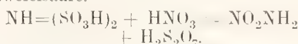

$$HNO_3 + 3HCl = Cl_2 + NOCl + 2H_2O.$$

Das Königswasser wird vielfach verwandt, z. B. zum Lösen von Gold und den Platinmetallen, zum Aufschließen von sulfidischen Erzen usw., denn weder Salzsäure noch Salpetersäure allein vermag so energisch zu wirken.

Derivate der Salpetersäure. Von den Halogenderivaten der Salpetersäure ist mit Sicherheit nur das

Nitrylfluorid, NO_2F, bekannt, welches aus Stickoxyd und Fluor bei sehr tiefer Temperatur entsteht. Es ist bei tiefer Temperatur eine farblose, stechend riechende Flüssigkeit, die bei —139° fest wird und bei —63,5° siedet. Von Wasser wird es unter Bildung von Salpetersäure und Flußsäure zersetzt.

Nitramid, NO_2NH_2, bildet sich durch Zersetzung von nitrokarbaminsaurem Kalium mit Schwefelsäure oder bei der Einwirkung von Salpetersäure auf eine Lösung von imidosulfonsaurem Kalium in konzentrierter Schwefelsäure.


$$NH{=}(SO_3H)_2 + HNO_3 = NO_2NH_2 + H_2S_2O_7.$$

Es kristallisiert in weißen Blättchen, die sich in Wasser, Alkohol und Aether leicht lösen und die bei 73° schmelzen unter Zersetzung in Stickoxydul und Wasser. Die Kristalle verpuffen unter Feuererscheinung bei Berührung mit Natronlauge. Die wässerige Lösung des Nitramids reagiert schwach sauer. Nitramid ist isomer mit untersalpetriger Säure.

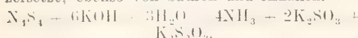
Verbindungen des Stickstoffs mit Schwefel. Es sind zwei Verbindungen bekannt: der feste Schwefelstickstoff, N_4S_4, und der flüssige Schwefelstickstoff, N_2S_5.

Fester Schwefelstickstoff, N_4S_4, entsteht bei der Einwirkung von trockenem Ammoniak auf eine mit Eis gekühlte Lösung von Schwefeldichlorid in Benzol. Der entstandene Niederschlag enthält außer Schwefelstickstoff noch Chlorammon und Schwefel. Durch Behandeln mit Wasser wird der Salmiak und durch Schwefelkohlenstoff der Schwefel entfernt. Auch bei der Einwirkung von Schwefel auf flüssiges Ammoniak entsteht Schwefelstickstoff. Es handelt sich dabei nicht um einen einfachen Lösungsvorgang, wie man früher annahm, sondern es findet eine umkehrbare Reaktion statt:


$$10S + 4NH_3 \rightleftarrows 6H_2S + N_4S_4.$$

Der Schwefelwasserstoff bildet dann mit überschüssigem Ammoniak Schwefelammon. Entfernt man durch Jodsilber den Schwefelwasserstoff, so verläuft die Reaktion von links nach

rechts und es hinterbleibt nach dem Abfiltrieren des Schwefelsilbers und Verdunsten des Ammoniaks Schwefelstickstoff. Wird aber die Lösung ohne weiteres verdunstet, so geht die Reaktion umgekehrt und es bleibt nur Schwefel zurück. Schwefelstickstoff bildet gelbrote, monokline Kristalle, die im Vakuum bei 80° ohne Zersetzung sublimieren. Durch Stoß explodiert er heftig. Er ist in Alkohol, Aether, Schwefelkohlenstoff usw. löslich. Schwefelstickstoff wird beim Kochen mit Wasser, worin er unlöslich ist, zersetzt; ebenso von Säuren und Alkalien.



$$N_4S_4 + 6KOH + 3H_2O = 4NH_3 + 2K_2SO_3 + K_2S_2O_3.$$

Schwefelstickstoff absorbiert Ammoniak und vermag damit eine leicht zersetzliche, braunrote Verbindung $N_4S_4.2NH_3$ zu bilden, die in Wasser löslich ist.

Mit Chlor und Brom bildet der Schwefelstickstoff die Verbindungen $N_4S_4Cl_4$, bezw. $N_4S_4Br_4$ und $N_4S_4Br_6$.

Aus Schwefelstickstoff und in Chloroform gelöstem Chlorschwefel (S_2Cl_2) entsteht das

Thiotrithiazylchlorid N_3S_4Cl. Die einwertige Gruppe N_3S_4, der man die Konstitution $[(N\equiv S)_3\equiv S]$ — zuschreibt, kann wie die Gruppe NH_4 mit Säuren Salze bilden, z. B. $N_3S_4NO_3$, N_3S_4CNS, N_3S_4Br usw.

Flüssiger Schwefelstickstoff N_2S_5 wurde durch Erhitzen von festem Schwefelstickstoff mit Schwefelkohlenstoff auf 100° unter Druck hergestellt. $N_4S_4 + 2CS_2 = N_2S_5 + S + 2CNS$.

Es ist eine tiefrote, leicht zersetzliche Flüssigkeit, die beim Abkühlen zu jodähnlichen, bei 10 bis 11° schmelzenden Kristallen erstarrt. Flüssiger Schwefelstickstoff ist in den meisten organischen Lösungsmitteln löslich, dagegen unlöslich in Wasser, von dem er unter Bildung von Ammoniak und Abscheidung von Schwefel zersetzt wird. Ebenso wie Wasser wirken Säuren und Alkalien.

7. Thermochemie. Die Bildungswärme des Ammoniaks wurde zu



$$N + 3H = NH_{3\,gasf.} + 11{,}89\ Cal.$$

gefunden.

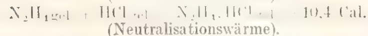
Die molekulare Verdampfungswärme beträgt bei 15° 5,0 Cal. Das Ammoniak hat von allen Flüssigkeiten, mit Ausnahme des Wassers, dessen molekulare Verdampfungswärme ca. 9,65 Cal. beträgt, die größte Verdampfungswärme. Deshalb findet das Ammoniak vielfach Verwendung in Kältemaschinen.

Die Schmelzwärme ist 1,84 Cal. pro Mol, also etwas größer als die des Wassers (1,44 Cal.). Die Lösungswärme von 1 Mol Ammoniak in viel Wasser ist 8,43 Cal.



$$NH_{3\,gel.} + HCl_{gel.} = NH_4Cl_{gel.} + 12{,}36\ Cal.$$

(Neutralisationswärme)



$$N_2H_{4\,gel.} + HCl_{gel.} = N_2H_4.HCl_{gel.} + 10{,}4\ Cal.$$

(Neutralisationswärme).

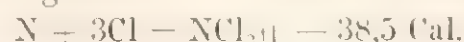
Die Bildungswärme des Hydrazins ist nicht bekannt.

Bildungswärme der Stickstoffwasserstoffsäure:



$$3N + H + aq. = N_3H_{gel.} - 62{,}1\ Cal$$

Bildungswärme des Chlorstickstoffs:

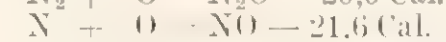


$$N + 3Cl = NCl_{3\,fl.} - 38{,}5\ Cal.$$

Alle Oxyde des Stickstoffs sind endotherme Verbindungen.



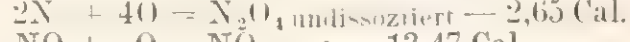
$$N_2 + O = N_2O - 20{,}0\ Cal.$$



$$N + O = NO - 21{,}6\ Cal.$$

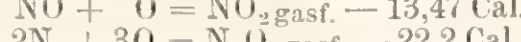


$$N + 2O = NO_{2\,gasf.} - 8{,}13\ Cal.$$

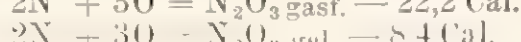


$$2N + 4O = N_2O_{4\,undissoziiert} - 2{,}65\ Cal.$$

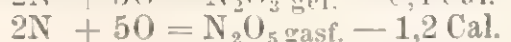
$$NO + O = NO_{2\,gasf.} - 13{,}47\ Cal.$$



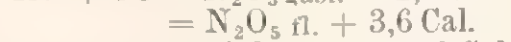
$$2N + 3O = N_2O_{3\,gasf.} - 22{,}2\ Cal.$$



$$2N + 3O = N_2O_{3\,gel.} - 8{,}4\ Cal.$$



$$2N + 5O = N_2O_{5\,gasf.} - 1{,}2\ Cal.$$



$$= N_2O_{5\,fl.} + 3{,}6\ Cal.$$



$$= N_2O_{5\,fest.} + 11{,}8\ Cal.$$

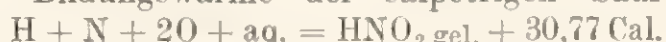


Bildungswärme der untersalpetrigen Säure:



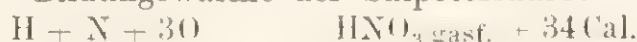
$$2N + 2O + 2H + aq. = N_2O_2H_{2\,gel} - 57{,}4\ Cal.$$

Bildungswärme der salpetrigen Säure:

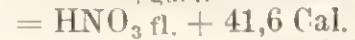


$$H + N + 2O + aq. = HNO_{2\,gel.} + 30{,}77\ Cal.$$

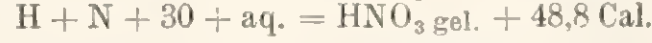
Bildungswärme der Salpetersäure:



$$H + N + 3O = HNO_{3\,gasf.} + 34\ Cal.$$



$$= HNO_{3\,fl.} + 41{,}6\ Cal.$$



$$H + N + 3O + aq. = HNO_{3\,gel.} + 48{,}8\ Cal.$$

Beim Auflösen von Ammoniumnitrat in Wasser sinkt die Temperatur erheblich. Werden z. B. 6 Teile Ammoniumnitrat in 10 Teilen Wasser von +13,6° gelöst, so sinkt die Temperatur auf —13,6, also um 27,2°.

8. Photochemie. Beim Durchgang elektrischer Entladungen durch stark verdünnten Stickstoff entstehen Linien- und Bandenspektren. Eine mit Stickstoff gefüllte Geißlersche Röhre strahlt beim Durchgang eines schwachen Stromes gelbes, bei Einschaltung einer Leydener Flasche, wodurch die Temperatur erhöht wird, weißes Licht aus.

Ausführliche Angaben über das Stickstoffspektrum findet man in:

Kayser, Handbuch der Spektroskopie.

Das Spektrum des Ammoniaks zeigt ein breites, grünlich-gelbes Band zwischen $\lambda = 568{,}8$ bis $562{,}7$.

Literatur. ***Abeggs*** *Handbuch der anorganischen Chemie, Bd.* **III**, *3.* — ***Gmelin-Kraut-Friedheim.*** *Handbuch der anorganischen Chemie, Bd.* **I**, *1.*

J. Gewecke.

b) *α*) Phosphor.

P. Atomgewicht 31,04.

1. Atomgewicht. 2. Geschichte. 3. Vorkommen. 4. Darstellung. 5. Allgemeine Charakteristik des Elements (Valenz, Elektrochemie). 6. Formarten und allotrope Modifikationen. 7. Analytisches. 8. Spezielle Chemie. 9. Thermochemie. 10. Photochemie. 11. Kolloidchemie.

1. Atomgewicht. Als Atomgewicht des Phosphors ist nach den letzten Festsetzungen

der Atomgewichtskommission (1913) 31,04 anzunehmen. — Dieses Atomgewicht ist in Uebereinstimmung mit dem Gesetz von Avogadro; mit der Regel von Dulong und Petit (die Atomwärme des farblosen Phosphors beträgt 5,5, die des roten 5,2 vgl. S. 543); mit der Lehre vom Isomorphismus (Isomorphie der Phosphate mit den Arsenaten, Isomorphie der organischen Phosphorbasen mit den Stickstoffbasen: also Isomorphie mit den entsprechenden Verbindungen der Nachbarelemente im periodischen System); endlich mit dem periodischen System ganz allgemein (alle Eigenschaften des Phosphors sind so, wie sie sich für ein Element vom Atomgewicht 31 nach der periodischen Gesetzmäßigkeit erwarten lassen).

2. **Geschichte.** „In des Kellers tiefem Dunkel laborierten Brand und Kunckel, pantschten in dem Harn herum, fanden so den Phosphorum." Diese Darstellung der Legende ist sowohl hinsichtlich der Methode als hinsichtlich der Entdeckerschaft ungenau: als einziger und alleiniger Entdecker ist der Hamburger Alchymist und iatrochemische Quacksalber Henning Brand M. D. (Medicinae Doctor) anzusehen. Als dieser im Jahre 1669 beim Eindampfen von Harn, aus dessen Rückständen er ein Goldelixier gewinnen wollte, die Retorte etwas stark heizte (wobei ihm der Kuchen anbrannte und die verkohlte organische Substanz die Harnphosphate reduzierte), da erschien plötzlich ein Stoff von magischem Glanz in der Vorlage: das Radium der Alchymisten, der Phosphorus mirabilis (φῶς φόρος = Lichtbringer = Lucifer; ein Laboratoriumsgehilfe Kunkels hat diesen in einer Schmähschrift als „stinkenden Lucifer" bezeichnet); es war dies wohl der größte Moment, der je einem dieser „dunklen Ehrenmänner" beschieden war. Die Kenntnis von der Entdeckung Brands blieb zunächst auf seine Hamburger Bekannten beschränkt, denen er von dem „kalten Feuer" oder kurz von „seinem Feuer" erzählte. Der „Triumphwagen des Phosphori" (in Analogie zu dem bekannten Buchtitel: „Der Triumphwagen des Antimonii") kam erst ins Rollen, als sich ihm eine Anzahl bekannter und berühmter Männer vorspannte.

Dies war zunächst der Chemiker Kunckel („Kammerdiener und Chymist" des Kurfürsten von Sachsen), der bei einem Besuch in Hamburg im Jahre 1676 von dem „kalten Feuer" Brands erfuhr. Er veranlaßte den kursächsischen Handelsrat Kraft, nach Hamburg zu kommen und es ist sicher, daß es den beiden gelang, Brand zur Mitteilung seines Verfahrens zu bewegen (Kunckel schreibt in einem Briefe an Brand: „Der bewußten Materie habe ich ein ziemliches Teyl. Habe zwey mahl destilliert, aber kein Feuer gekriecht"; der Anspruch Kunckels ist also unbegründet, alles Wesentliche war ihm bekannt).

Kraft erhielt von Brand auch eine Probe Phosphor, mit der er eine Rundreise an die Höfe von Berlin, Hannover und London antrat; überall erregte der Phosphor trotz seiner anrüchigen Herkunft großes Interesse. In Berlin am Hofe des Großen Kurfürsten erhielt der neue Stoff auch seinen Namen, indem ihn der Leibarzt des Kurfürsten Elsholz in seinem Bericht so bezeichnete zunächst mit dem Zusatz „mirabilis", um ihn von den Leuchtsteinen (Bologneser Leuchtsteine), die wie alle ohne Wärmeentwickelung leuchtenden Stoffe als „Phosphore" bezeichnet wurden, zu unterscheiden.

Am hannöverschen Hofe wurde dann Leibniz mit dem Phosphor bekannt. Er veranlaßte Brand nach Hannover zu kommen und dort die Darstellung in größerem Maße (im Lager der kurfürstlichen Truppen) vorzunehmen. Durch seine ausgedehnten Beziehungen trug er viel zur Verbreitung der Entdeckung bei; er sandte zunächst einen Bericht an das Journal des Savants und später Phosphorproben und eine Beschreibung des Verfahrens an Huygens und den Grafen Tschirnhaus, durch den es zur Kenntnis der Pariser Akademie kam. Von Hannover reiste Kraft nach London an den Hof Karls II., wo sich Boyle sehr für den Phosphor interessierte und ihn eingehend untersuchte. Er fand, daß sich beim Verbrennen des Phosphors ein saurer Rückstand bildet; außerdem wies er sein Vorkommen im Senfsamen nach und entdeckte, daß die Lösung in Terpentinöl nicht leuchtet, im Gegensatz zu den Lösungen in Nelken- und Zimtöl (s. u.).

Die Beobachtungen von Boyle wurden von Kletwich in seiner „Dissertatio de phosphoro liquido et solido" (Frankfurt a. d. Oder 1688) mitgeteilt, die wohl die erste zusammenfassende Publikation über den Phosphor ist. Wenig Inhalt hat die Schrift von Kunckel „Vom Phosphoro mirabili und dessen leuchtenden Wunderpillulae", die im wesentlichen eine Reklame für die Wunderpillulae darstellt. Diese sollten gegen Infektion schützen und wurden zu 1 Groschen für das Stück in der Apotheke zum Güldenen Löwen in Leipzig in der Grimmaischen Straße verkauft.

Ueberhaupt war der Preis des Phosphors lange Zeit ein sehr hoher, was bei der umständlichen Herstellung begreiflich erscheint: noch 1730 kostete eine Unze 10 bis 16 Dukaten.

Durch verschiedene Verbesserungen des Verfahrens wurde der Preis ermäßigt, bis dann durch den Schweden Gahn 1770 in der Knochenasche, der „animalischen Erde", ein bequemes Material für die Phosphordarstellung gefunden wurde. Gahns Freund, der berühmte Scheele, hatte gefunden, daß die Knochenasche Kalk gebunden an eine unbekannte Substanz enthalte. Gahn wies nach, daß diese Substanz Phosphorsäure sei und stellte im kleinen daraus Phosphor dar. Scheele nahm dann in Upsala die Fabrikation auf nach einem Verfahren, das im wesentlichen noch heute ausgeübt wird.

Es ist klar, daß der Phosphor in der Zeit der Phlogistontheorie eine große Rolle spielen mußte: so deutlich war die Existenz des „Phlogiston" noch nie erwiesen worden, wie beim Phosphor, aus dem er schon bei gewöhnlicher Temperatur entwich. Phosphor mußte eine enorm phlogistonreiche Verbindung der Phosphorsäure sein, die wie Boyle und Marggraf nachgewiesen hatten, bei der Verbrennung des Phosphors zurückbleibt, während dieser umgekehrt wieder entstand, wenn man durch die Erhitzung mit Kohle den „Phlogiston" wieder in die Phosphorsäure hineinpraktizierte.

Doch der Phosphor mußte überall dabei

sein. Der Liebling der Phlogistonzeit steht auch, zugleich mit dem anderen diabolisch-luciferischen Element, dem Schwefel, an den Pforten der neueren Chemie: Phosphor und Schwefel sind die Elemente, an denen Lavoisier, der Ueberwinder der Phlogistontheorie, in seiner Mitteilung an die Pariser Akademie die Gewichtszunahme bei der Verbrennung nachwies: Phosphor ist keine Phlogistonverbindung sondern ein Element. So hatte sich der Phosphor wieder als φῶς φόρος, als Lichtbringer, erwiesen.

Aber in noch höherem Sinne hat der Phosphor auf diesen Namen Anspruch: in allen wichtigsten Organen der Pflanzen und Tiere, in Blüten, Samen, Nerven, Gehirnen (Lecithin) ist der Phosphor ein unentbehrlicher Bestandteil, sein Vorhandensein ist die Voraussetzung für die Tätigkeit des obersten aller φῶς φόροι, des menschlichen Gehirns: Ohne Phosphor kein Gedanke — sagt der Materialismus.

3. Vorkommen. Bei der leichten Oxydierbarkeit des Phosphors kann man nicht erwarten, das Element in freiem Zustand in der Natur zu finden (auch der träger reagierende rote Phosphor ist nirgends angetroffen worden): Die Form, in welcher der Phosphor gegeben ist, ist sein höchstes Oxydationsprodukt, die Phosphorsäure oder vielmehr deren Salze, vor allem das Kalksalz. Dieses bildet als Apatit (Doppelsalz mit CaF_2 oder $CaCl_2$: $3Ca_3P_2O_8 . CaCl_2(F_2)$ oder ein isomorphes Gemisch von beiden) den Urquell aller Phosphorsäure. In allen Eruptivgesteinen findet sich Apatit, meist in verschwindender Menge, oft nur mikroskopisch nachweisbar, zuweilen auch in abbauwürdiger Konzentration, aber nur selten einen Gehalt von 2% überschreitend. Apatit ist weitaus das wichtigste aller Phosphate.

Von diesem primären Vorkommen führt ein doppelter Weg zu den reichen sekundären Lagern, die von der Phosphatindustrie ausgebeutet werden: einmal die Verwitterung der Urgesteine, ihre Zersetzung durch die Kohlensäure der Gewässer und die Ablagerung der gelösten Phosphorsäure in Form schwerlöslicher Salze unter geeigneten Bedingungen (meist wieder Calcium- aber auch Aluminium- und Eisenphosphate); und dann der große Kreislauf durch die organische Natur, durch Pflanzen und Tiere.

Ohne Phosphor kann keine Pflanze existieren, ein gewisses Maß ist nötig zum Wachstum, ein etwas höheres zur Fortpflanzung, zur Blüten- und Samenbildung. Alle Teile der Pflanzen enthalten Phosphor, da dieser ein notwendiger Bestandteil des Zellprotoplasmas besonders aber der Zellkerne ist (Nukleine); eine starke Anreicherung findet in den Blüten und Samen statt (auf 100 Teile Trockensubstanz enthalten Phosphorsäure: Kiefernholz 0,02, Weizenstroh 0,28, Weizenkörner 0,95 Teile). Nur die orthophosphorsauren Salze kommen als Nährstoffe für die Pflanzen in Betracht; die niedrigeren Oxydationsstufen sind Pflanzengifte.

Mit der pflanzlichen Nahrung geht der Phosphor in den tierischen Körper über, wo er dieselbe wichtige Rolle im Zellplasma und in den Zellkernen spielt, außerdem aber in Form von Calciumphosphat zur Verfestigung des Skelettes dient (das zu zwei Dritteln aus Calciumphosphat besteht) und in Form von komplexen organischen Verbindungen (Lecithin) am Aufbau der Nerven und des Gehirns beteiligt ist.

Das Phosphorkapital, das so der Erde entzogen wird, muß auf Heller und Pfennig wieder zurückgezahlt werden: Die abgestorbenen Pflanzen und die tierischen Kadaver sinken zurück in den mütterlichen Boden und bilden dort Ansammlungen (Lager vorweltlicher Tierskelette, Knochenbreccien, Bonebeds), oder sie geben ihren Phosphor durch Auslaugung und Wiederausfällung an unterlagernde Gesteine ab. Aber auch schon bei Lebzeiten der Tiere werden durch die Defäkation bedeutende Rückzahlungen geleistet; wie erfolgreich diese Tätigkeit unter für die Erhaltung günstigen Umständen sein kann, beweisen die Guanolager (Vogelexkremente) und die Koprolithen (Exkremente vorweltlicher Tiere).

Der Phosphorgehalt der Erdkruste beträgt etwa 0,09%.

4. Darstellung und Verwendung. Die Darstellungsmethode ist in den Hauptzügen noch heute die von Scheele (s. o.): Da das tertiäre Phosphat durch Kohle nicht reduziert wird, löste Scheele die Knochenasche in Salpetersäure auf, fällte das Calcium mit Schwefelsäure aus, konzentrierte die Säure bis zu Sirupkonsistenz und unterwarf den Rückstand nach Mischung mit Kienruß der Destillation (aus einer eisernen Retorte); der übergehende Phosphor wurde unter Wasser kondensiert.

Der Nachteil dieser Methode ist der Verlust an Phosphorsäure beim Eindampfen, da die freie Säure mit Wasserdämpfen flüchtig ist. Man zersetzt deshalb heute nur bis zum primären löslichen Phosphat (mit Schwefelsäure); beim Glühen entsteht Metaphosphat, das durch Kohle reduziert wird. Die Knochenasche ist durch Mineralphosphate ersetzt worden.

Auch dieses Verfahren (der Pelletierprozeß) zeigt noch einen Uebelstand: während des Prozesses bildet sich stets Tricalciumphosphat zurück. Um diesen Verlust zu vermeiden, schlug Wöhler vor, Sand zuzusetzen, um durch die feuerbeständige Kieselsäure das zurückbleibende Triphosphat zu zersetzen. Es sind aber hierfür Temperaturen nötig, bei denen die Retortenwände durch das heiße Calciumsilikat angegriffen werden. In neuerer Zeit ist durch die elektrische

Erhitzung von innen die Aufnahme des Wöhlerprozesses möglich geworden: die Retortenwände werden dabei durch erstarrtes Calciumsilikat geschützt, die Reaktion findet nur im Inneren statt; es wird in kontinuierlichem Betrieb gearbeitet; die Dämpfe können hier nicht mehr in Wasser kondensiert werden, sondern es sind hierzu besondere Kühlanlagen nötig. Auch bei diesem Verfahren kann, entgegen der Voraussetzung, nicht die ganze Phosphorsäure gewonnen werden, die Ausbeute ist ca. 92%, der Rest bleibt in der Schlacke und kann auch durch einen Ueberschuß von SiO_2 und neues Zusammenschmelzen nicht in Freiheit gesetzt werden (Silicophosphorsäuren). Trotzdem ist die Ausbeute erheblich besser als beim Pelletierprozeß, indem bei diesem ein großer Teil des produzierten Phosphors nicht zusammengeschmolzen werden, während dieser Verlust beim elektrischen Verfahren gering ist.

Temperatur	Pelletier-Prozeß	Wöhler-Prozeß
300 bis 600°	Auftreten von SO_2; Reduktion von H_2SO_4.	
700°	Einwirkung von Wasser und H_2SO_4 auf Kohle; brennbare Gase.	erste Gasentwickelung.
740°	Erste Spur Phosphor; Kohlenoxyd.	—
960°	Eigentliche Destillation.	—
1000°		Auftreten brennbarer Gase.
1150°	–	Grünfärbung der Flamme; erste Phosphorspuren.
1170°	Ende des Destillationsprozesses.	—
1200°	—	Sichtbare Mengen P in der Vorlage.
1300°		Eigentliche Destillation.
1450°		Ende des Prozesses.
Ausbeute	92,5% (s. aber oben!)	92%

Die Verunreinigungen des Rohphosphors sind hauptsächlich durch die Herkunft der verwendeten Schwefelsäure bedingt, (Schwefelsäure aus ungereinigten Kiesabbränden bringt viel Arsen mit). Die Reinigung geschieht, indem man den Rohphosphor durch Leder oder poröse Steine preßt und ihn dann aus eisernen Retorten destilliert. Durch Schmelzen unter verdünnter saurer Bichromatlösung werden gelbe und rote Färbungen entfernt und man erhält ein nahezu farbloses klares Produkt, das in Stangen- oder Keilform in den Handel gebracht wird.

Roten Phosphor erhält man durch Erhitzen des weißen Phosphor in verschlossenen eisernen Kesseln zunächst auf 240°, weiterhin auf 260°. Das glasige spröde Reaktionsprodukt wird mit Wasser gemahlen und durch Behandlung mit Natronlauge, oder durch Schütteln mit Chlorcalciumlösung und CS_2 von weißem Phosphor befreit, es bleiben immer kleine Mengen von weißem Phosphor zurück.

Verwendung: Außer für chemische Präparate wird der Phosphor hauptsächlich in der Zündholzfabrikation und in der Legierungstechnik (Phosphorbronzen) verwendet (s. den Artikel „Legierungen"); über die Bedeutung des Phosphor für die Vegetation vgl. S. 540 und den Artikel „Düngemittel".

5. Allgemeiner physikalischer und chemischer Charakter des Elements. Valenz. Elektroaffinität. Physiologische Wirkung. Das Atomgewicht 31 bringt den Phosphor in die 5. Vertikalreihe des periodischen Systems, in die Nachbarschaft von N, As, Sb (vertikal) und Si, S (horizontal). Aus den allgemeinen Regelmäßigkeiten des periodischen Systems mit Berücksichtigung der an dieses sich anschließenden Abeggschen Anschauungen ergibt sich etwa folgende Diagnose:

5a) Allgemeiner physikalischer und chemischer Charakter: Rein metalloides Element (erst bei den höheren Gliedern der 5. Reihe [As, Sb] treten metallische Eigenschaften auf). In dem Charakter der Verbindungen kommt die „Mittelständigkeit" (im Gegensatz zu denen der „endständigen" Halogene) zum Ausdruck.

Bestätigung: Phosphor ist in allen Modifikationen ein schlechter Wärmeleiter, ein Nichtleiter der Elektrizität (Isolator); er bildet eine gasförmige Wasserstoffverbindung, seine Sauerstoffverbindungen sind Säureanhydride. Die Verbindungen des Phosphors mit negativeren Elementen (den Halogenen) haben keinen eigentlichen Salzcharakter, sie werden durch Wasser völlig zersetzt; die Verbindungen mit positiveren Elementen, die Phosphide, unterliegen z. T. (die Alkaliphosphide) ebenfalls der Hydrolyse, z. T. (die Schwermetallphosphide) besitzen sie metallischen Charakter und große Legierungsfähigkeit: In diesem Verhalten kommt die „Mittelständigkeit" des Elements zum Ausdruck, während extreme Polarität zu salzartigen Verbindungen führt.

5b) Valenz: Das Element kann 3- und 5-wertig auftreten (Maximalvalenz); dreiwertig ist es gegen Wasserstoff (negative Valenz; nach Abegg „Normalvalenz"),

fünfwertig gegen Sauerstoff und die Halogene (positive Valenz, „Kontravalenz"). Die hohe Kontravalenz kann zum Teil latent bleiben und es lassen sich hier Isomerien erwarten; es besteht infolge des höheren Atomgewichts eine Neigung in den 5-wertigen Zustand überzugehen, die beim Stickstoff nicht vorhanden ist.

Bestätigung: Die höchste Wasserstoffverbindung des Phosphors ist der gasförmige Phosphorwasserstoff PH_3, die höchste Sauerstoffverbindung das Pentoxyd P_2O_5, die höchsten Halogenverbindungen sind PF_5, PCl_5 usw.

Die 5-Wertigkeit des Phosphors wird besonders durch das PF_5 bewiesen, das bei gewöhnlicher Temperatur die theoretische Dampfdichte besitzt. Weitere Beweisstücke sind die Phosphoniumverbindungen, z. B. $(C_2H_5)_4P.J$, die durch Wasser nicht zersetzt werden. Und endlich die interessanten Isomeriefälle, die nur durch Valenzwechsel erklärt werden können: Triphenylphosphinoxyd $(C_6H_5)_3 \vdots P{:}O$ und Diphenylphenoxylphosphin $(C_6H_5)_2{:}P.(OC_6H_5)$, und weiter Phosphorigsäureester $P \vdots (OC_2H_5)_3$ und Alkylphosphinsauren $O{:}P \vdots (C_2H_5)\,(OC_2H_5)_2$.

Der Phosphor kann also 3- und 5-wertig gegenüber Sauerstoff und den Halogenen auftreten, er bevorzugt aber die höhere Stufe: $(C_2H_5)_3P$ addiert Alkyljodide, Sauerstoff, Schwefel; das Additionsprodukt $(C_2H_5)_4 \vdots P.J$ geht in das 5-wertige Oxyd $(C_2H_5)_3 \vdots P{:}O$ über im Gegensatz zu dem Tetraäthylammoniumhydroxyd, welches das tertiäre Amin $(C_2H_5)_3 \vdots N$ bildet. Die Phosphinoxyde sind unzersetzt destillierbar, während die Aminoxyde zerfallen, ja der Sauerstoff kann den Phosphinoxyden nicht einmal durch metallisches Natrium entzogen werden. — Die Phosphate sind im Gegensatz zu den Nitraten glühbeständig.

P_2O_4 kann für die 4-Wertigkeit des Phosphors nicht Anspruch genommen werden: beim Lösen in Wasser entsteht H_3PO_3 und H_3PO_4. Es ergibt sich auch hier 3- und 5-Wertigkeit.

5c) Molekulare Komplexe und allotrope Modifikationen: Die große Zahl der Kontravalenzen und der geringe Unterschied in der Zahl und damit auch in der Stärke der beiden Valenzarten läßt wie bei der ganzen Gruppe der mittelständigen Elemente (S, As, Sb, Si, C) auch beim Phosphor komplexe Elementarmolekeln und Verbindungen sowie allotrope Modifikationen erwarten.

Bestätigung: Der Phosphordampf besteht bei gewöhnlicher Temperatur aus 4-atomigen Molekeln; die festen Phosphorwasserstoffe bilden Molekeln von beträchtlicher Größe ($P_{12}H_6$, P_9H_2), die an die Silicium- und Kohlenstoffverbindungen erinnern; es sind 2 oder 3 Phosphormodifikationen bekannt (farblose, roter (?), Hittorfscher Phosphor).

5d) Elektroaffinität. Komplexe Ionen: Der rasche Abfall der Elektroaffinität beim Uebergang von der Halogen- zur Schwefelgruppe läßt erwarten, daß beim Phosphor die Affinität zum Elektron nur noch ganz gering sein wird. Derselbe Schluß ergibt sich aus der Betrachtung der Atomvolumkurve, wo der Phosphor nahe einem Minimum steht (das Atom als Kondensator: geringe Kapazität, geringe Haftintensität). Weder positive noch negative Einzelionen werden also in praktisch in Betracht kommendem Betrage vorhanden sein, dagegen wird eine große Neigung zur Komplexbildung bestehen (um die Kapazität und damit die Elektroaffinität zu erhöhen).

Bestätigung: Alkali- und Erdalkaliphosphide sowohl wie die Phosphorhalogenverbindungen werden durch Wasser vollständig zersetzt (Darstellung von PH_3 aus Phosphorcalcium). Trotzdem muß an der Existenz von P'''-Ionen festgehalten werden und eben die Zersetzung der Phosphide wird als Beweis hierfür angesehen, indem ihr rascher Verlauf auf eine Ionenreaktion hinweist. Ebenso müssen $P^{\cdot\cdot\cdot}$- und $P^{\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot}$-Ionen angenommen werden auf Grund der allerdings sehr geringen Leitfähigkeit der Phosphorverbindungen PCl_3, PBr_3, PBr_5 in flüssigem SO_2 und organischen Lösungsmitteln (Walden); auch die Reaktion von PCl_3 mit Kupferoleat (beide in völlig trockenem Zustand), die rasch verläuft und $CuCl_2$ und Phosphoroleat ergibt, spricht für die Existenz von positiven Ionen. In der Reihe $BiCl_3$, $SbCl_3$, $AsCl_3$, PCl_3 ist nur ein quantitativer Unterschied in der Dissoziation anzunehmen. Das schwache negative Einzelion verstärkt seine Elektroaffinität durch Anlagerung von Sauerstoff und bildet so die Anionen der Oxysäuren des Phosphors; die maximale Wertigkeit ist bei diesen die des Einzelions (P''', PO_4'''; analog S'', SO_4'' und Cl', ClO_3', ClO_4'); auch die Stärke der Elektroaffinität wird durch das Einzelion bestimmt ($ClO_3' > SO_4'' > PO_4'''$).

6. Eigenschaften des Elements. Formarten. Allotropie. Der Phosphor kommt in mehreren Modifikationen vor, über deren Zahl und Art noch keine völlige Uebereinstimmung besteht. Es werden zuerst die Tatsachen, dann die Theorien gegeben.

6a) Weißer, farbloser, gelber, gewöhnlicher Phosphor. *α*) Aeußere Erscheinung. Der gewöhnliche Phosphor, wie er bei der Fabrikation erhalten wird, ist ein in reinem Zustand farbloser, meist aber schwach gelb gefärbter Körper; wenn er langsam erstarrt ist, ist er vollkommen durchsichtig. Bei gewöhnlicher Temperatur läßt er sich wie Wachs schneiden, mit abnehmender Temperatur wird er fest und spröde. Er hat kristalline Struktur (Aehnlichkeit des Bruchs mit dem einer Zinkstange), kann aber auch, aus dem Schmelzfluß oder aus Lösungen (in CS_2, Benzol, besonders Jodmethylen), in schönen Kristallen erhalten werden; die Kristalle sind regulär (Rhombendodekaeder mit Würfeln kombiniert), also isotrop; durch Sublimation im Vakuum können außerordentlich vielflächige Kriställchen erhalten werden (bis zu 218 Flächen!) mit fast allen Formen des regulären Systems. — Phosphor ist schwerer als Wasser; Dichte bei 0°, 20°, 40°: 1,83676, 1,82321, 1,80681.

Die Hauptverunreinigung des Handelsphosphors ist Arsen (s. S. 541). Durch zweimalige

Destillation mit Wasserdampf in CO_2-Atmosphäre wird ein arsenfreies Produkt erhalten.

β) Thermische Eigenschaften. Die spezifische Wärme beträgt zwischen —78° und +10° 0,1699 (Atomwärme 5,27) zwischen + 7 und + 30° 0,1851 (Atomwärme 5,74). Es ergeben sich also wie bei den anderen Metalloiden von niederem Atomgewicht Abweichungen vom Dulong-Petitschen Gesetze, die mit steigender Temperatur sich vermindern (Untersuchungen von Nernst; vgl. die Artikel „Thermochemie" und „Metalle").

Schmelzen. Der Schmelz- und Erstarrungspunkt liegt bei 44°, doch treten Abweichungen verschiedener Art auf. Zunächst neigt der Phosphor sehr stark zur Unterkühlung, besonders wenn er unter Wasser geschmolzen wurde, oder wenn das Präparat unter alkoholischer Kalilauge aufbewahrt oder aus CS_2-Lösung gewonnen wurde; es wurden Unterkühlungen bis zu —15° beobachtet; durch Impfen mit festem Phosphor wird die Schmelze zur Erstarrung gebracht.

Bei den Unterkühlungen ist die Gefrierpunktsdepression in Betracht zu ziehen, die infolge der geringen Schmelzwärme schon bei kleinen Verunreinigungen beträchtliche Werte erreicht (1% CS_2 erniedrigt um 5,1°). Die Schmelzwärme beträgt für 1 kg nur 5,034 Cal, sie ist stark von der Temperatur abhängig (27,35°: 4,744 Cal/kg; 40,05°: 4,970 Cal/kg); daraus berechnet sich für 1 Mol fremde Substanz auf 100 g Phosphor eine Depression von 384°, gefunden wurde mit Naphtalin der zu niedrige Wert 332.

Von größerem Interesse sind die Abweichungen, die nach der anderen Seite beobachtet wurden (Smits): wird Phosphor aus siedendem Wasser rasch abgekühlt, so zeigt sich, daß er bereits über 44° unterkühlt ist; es konnte ein Erstarrungspunkt von 46° erreicht werden. Diese Erscheinungen deuten auf ein „pseudobinäres System" hin (vgl. S. 552ff).

Beim Schmelzen vermehrt sich das Volumum 3,45%: die Dichte der Flüssigkeit ändert sich von 30 bis 290° von 1,7684 bis 1,4850.

Sieden. Dampfdruck. Der Siedepunkt liegt bei 290°, aber schon bei gewöhnlicher Temperatur ist der Phosphor erheblich flüchtig (Geruch, leuchtende Dämpfe) und die Verflüchtigung mit Wasserdampf ist so stark, daß auf diese Weise, wie oben erwähnt wurde, die Reinigung vorgenommen wird. Auch beruht hierauf der Nachweis des Phosphors nach Mitscherlich.

Temperatur	Druck mm	Beobachter
165°	120	Schrötter
200°	266	
230°	514	
290°	760	
358°	4195	Hittorf
447°	5320	
530°	8044	
	Atm.	
360°	3,2	Troost und Hautefeuille
440°	7,5	
494°	18,0	
511°	26,2	

Diese Zahlen sind mit verschiedenen Vorbehalten aufzunehmen. Von 240° ab beginnt mit steigender Geschwindigkeit die Umwandlung in die rote Modifikation und solange deren Beziehungen zu der farblosen nicht völlig geklärt sind, ist natürlich auch die Dampfdruckkurve nicht definiert („Umwandlungsdrucke"; vgl. 6d). Hier soll noch auf einen anderen Punkt hingewiesen werden. Von Ramsay wurde aus der Oberflächenspannung des farblosen Phosphors (s. u.) die kritische Temperatur (die direkt wegen der Umwandlung in roten Phosphor nicht beobachtet werden kann) zu rund 420° berechnet. Damit wären natürlich „Dampfdrucke" über 420° unvereinbar, da ja kein heterogenes System mehr vorläge. Diese Bestimmung der kritischen Temperatur aus der Oberflächenspannung, deren Ergebnis noch zu anderen Kollisionen (s. S. 552) führt, ist aber beim Phosphor wegen der zweifelhaften Einheitlichkeit des Materials, großen Bedenken ausgesetzt.

Ueber die Verdampfungswärme liegen keine sicheren Angaben vor.

γ) Molekulargewicht. $\alpha\alpha$) Im gasförmigen Zustand. Dampfdichte. Daß das Phosphormolekül komplex sein muß, geht schon aus dem Verhältnis der spezifischen Wärmen hervor, für das bei 300° der Wert 1,175 gefunden wurde (1,66 für einatomige Gase, 1 für komplizierte Moleküle). Die Dichte wurde von Troost und Hautefeuille zu 4,35 bei 500°, zu 4,50 bei 1040° bestimmt (für P_4 4,294). Später beobachteten V. Meyer und Biltz bei 1484° 3,632, bei 1677° 3,226; also Zerfall in einfachere Moleküle. Durch die Untersuchungen von Stock und Gibson wurde dann die Frage völlig geklärt.

In der Tabelle sind Werte der Dichte Δ, bezogen auf H_2 von gleicher Temperatur und gleichem Druck, und des entsprechenden Dissoziationsgrades γ angegeben:

	Δ	γ	mm
t = 700°	61,5	—	P = 480
	61,9	—	P = 75
t = 800°	60,9	0,01	P = 542
	59,0	0,04	P = [illegible]
t = 900°	59,2	0,04	P = 608
	55,0	0,12	P = 90
t = 1000°	55,9	0,10	P = 694
	50,0	0,23	P = 110
t = 1100°	51,3	0,20	P = 810
	43,6	0,41	P = 145
t = 1200°	46,0	0,34	P = [illegible]
	38,3	0,61	P = 175

Die Dissoziation beginnt also zwischen 700 und 800°; die Werte weichen von den V. Meyerschen stark ab, die Dichte 45, die

dort erst über 1700° erreicht wird, stellt sich hier schon bei 1200° ein. Es liegt hier offenbar ein prinzipieller Fehler der V. Meyerschen Methode vor, da die angewendete Bestimmung mit dem Gibsonschen Quarzmembranmanometer sicher einwandfrei ist.

Für die Gleichung $P_4 \rightleftharpoons 2P_2$ ergibt sich die Dissoziationsisotherme $\frac{4(\delta - \Delta)^2 P}{(2\Delta - \delta)\delta} = K$, wo δ die normale Dichte bezeichnet; da kleine Beobachtungsfehler von Δ große Aenderungen von K zur Folge haben, wurden aus den Mittelwerten von K die Dichten Δ' zurückberechnet und mit den beobachteten verglichen:

t	P	K	Δ	Δ'
1000°	661 mm	33,2	55,5	55,9
1000°	498 „	26,2	55,2	55,1
1000°	283 „	27,6	53,4	53,3
1000°	119 „	26,8	50,0	49,8

Es kann somit als sicher gelten, daß die Dissoziation in dem geprüften Druckgebiet bis 1200° nur nach $P_4 \rightleftharpoons 2P_2$ stattfindet.

Aus den Dissoziationsgraden bei verschiedenen Temperaturen berechnen sich (s. den Artikel „Thermochemie“) folgende Dissoziationswärmen:

900 bis 1000°	—50300 Cal.
1000 bis 1100°	—49400 „
1100 bis 1200°	—49200 „

und hieraus mit dem Wert —49200 für 1300° die Dissoziationsgrade:

bei	1 Atm.	Druck	60%
„	½ „	„	69%
„	100 mm	„	89%

Von Preuner und Brockmöller wird in demselben Temperaturgebiet auch die Dissoziation $P_2 \rightleftharpoons 2P_1$ angenommen, doch scheinen die Messungen weniger genau zu sein.

$\beta\beta$) Im flüssigen Zustand. Oberflächenspannung. Der Temperaturkoeffizient der molekularen Oberflächenenergie ist für $M = P_4$ normal (vgl. aber S. 543).

t	s	γ	$\gamma\left(\frac{M}{s}\right)^{2/3}$	Temperaturkoeffizient
78,3°	1,714	43,09	748,2	2,205
132,1°	1,664	35,30	629,6	

$\gamma\gamma$) In Lösungen. Auch in Lösungen ist das Phosphormolekül vieratomig, wie aus Siedepunktsbestimmungen an CS_2-Lösungen und aus Gefrierpunktsbestimmungen an Benzollösungen hervorgeht.

δ) Optische Eigenschaften. Das Lichtbrechungsvermögen ist groß. Der Brechungsexponent bei 29,2° ist für die Spektrallinie H_α: (fest) 2,09300, (flüssig) 2,06032.

ε) Elektrische Eigenschaften. Phosphor ist ein Isolator. Die Dielektrizitätskonstante beträgt bei 20° für festen Phosphor 4,1.

ζ) Chemische Eigenschaften. $\alpha\alpha$) Löslichkeit. In Wasser ist Phosphor nur spurenweise löslich (Phosphorwasser leuchtet beim Schütteln mit Luft), etwas besser lösen: Alkohol, Glyzerin, Eisessig, viel besser: Aether, Benzol, ätherische und fette Oele (Terpentinöl, Lebertran), die besten Lösungsmittel sind: Methylenjodid, Chlorschwefel, PCl_3 und vor allem PBr_3 und CS_2, mit denen Phosphor zerfließt wie Zucker mit Wasser (1 Teil CS_2 löst 18 Teile Phosphor).

$\beta\beta$) Verbindung mit anderen Elementen. Phosphor verbindet sich mit positiven und negativen Elementen zu meist unbeständigen Verbindungen, die durch Hydrolyse in die Sauerstoffverbindungen übergehen. Mit den Halogenen und mit Schwefel und Sauerstoff erfolgt direkte Verbindung schon bei gewöhnlicher Temperatur, eine Stickstoffverbindung wird auf einem Umweg erhalten. Mit Wasserstoff bilden sich mehrere Verbindungen, der gewöhnliche gasförmige Phosphorwasserstoff, der flüssige, und zwei feste Phosphorwasserstoffe, mit Alkalien und Erdalkalien bilden sich leicht hydrolysierbare Phosphide, mit den Schwermetallen ziemlich beständige, die metallischen Charakter haben und in Legierungssysteme eintreten können. Von besonderem Interesse ist die Vereinigung mit Sauerstoff (s. u.). Phosphor ist ein starkes Reduktionsmittel: aus den Salzlösungen der edleren Metalle (Ag, Cu) wird direkt das Metall niedergeschlagen.

Auf Alkalihydroxyde wirkt der weiße Phosphor wie die Halogene; es wird unterphosphorigsaures Salz und Phosphid gebildet, das durch Hydrolyse weiter zerfällt. — Mit wässerigalkoholischer Lauge entstehen rote Lösungen, die Polyphosphide enthalten. — Mit flüssigem NH_3 und mit wässeriger NH_3-Lösung im Sonnenlicht entstehen Salze des festen Phosphorwasserstoffs P_9H_2.

Phosphor ist ein Katalysatorgift für die Zersetzung des Wasserstoffsuperoxyds durch kolloidales Platin. Er ist noch in einer Konzentration von 1 g-Mol. in 20000 Litern wirksam.

$\gamma\gamma$) Phosphorleuchten. Maximaler Leucht- und Oxydationsdruck. Das geheimnisvolle Leuchten, mit dem der Phosphor in die Welt trat und das natürlich immer der eigentliche Gegenstand des Laieninteresses war, ist auch für die Wissenschaft von dauerndem Interesse und auch zum Teil geheimnisvoll geblieben, d. h. das alte Geheimnis ist gelöst, aber ein neues ist hinzugekommen. — Die Angaben weichen stark voneinander ab und widersprechen sich zum Teil, aber einige Punkte sind doch sichergestellt, vor allem der ursächliche Zusammenhang des Leuchtens mit der Oxydation und die Existenz eines maximalen Sauerstoffdrucks für das Leuchten und die Oxydation in feuchter Luft oder feuchtem Sauerstoff

Die Leuchterscheinungen des Phosphors wurden natürlich zunächst in der Luft beobachtet, d. h. bei einem Sauerstoffpartialdruck von ca. 150 mm. Als man sich von diesem gegebenen Mittelwert im Experiment nach oben und unten entfernte, ergab sich auf beiden Seiten eine Ueberraschung: das Leuchten hörte nicht auf, wenn man die Luft ganz wegnahm (Vakuum) oder sie durch indifferente Gase (Wasserstoff, Stickstoff) ersetzte, es hörte dagegen auf, wenn man die Luft durch reinen Sauerstoff ersetzte (und begann wieder, wenn man diesen verdünnte, bei einem bestimmten Druck).

Die auffallende Erscheinung, daß Phosphor auch im Vakuum leuchtete, veranlaßte Berzelius, die Ursache des Leuchtens in einem rein physikalischen Vorgang, der Verdampfung, zu sehen. Später wurde sicher nachgewiesen, daß bei völliger Abwesenheit von Sauerstoff kein Leuchten stattfindet, es genügen aber dafür so geringe Mengen, wie sie in den „Vacua" und in den verwendeten indifferenten Gasen noch vorhanden waren. Auf der anderen Seite wurde das Ausbleiben des Leuchtens und der Oxydation in reinem Sauerstoff gegen die Verbrennungstheorie Lavoisiers ins Feld geführt (Göttling, „Beobachtungen zur Richtigstellung des neuen Systems").

Nur in feuchtem Sauerstoff bleibt bei höheren Drucken das Leuchten aus, in gut (aber nicht vollständig!) getrocknetem Sauerstoff dagegen fand bei den Versuchen von Russell (s. u.) bis zu 3 Atm. schwaches Leuchten statt. Allerdings existiert auch hier eine Grenze, indem (bei 13 bis 14°) unterhalb 500 mm das schwache Leuchten in ein starkes überging. In feuchtem Sauerstoff werden von Centnerszwer und dem neuesten Beobachter, Scharff, übereinstimmend 570 mm bei 20° als Maximaldruck angegeben (die älteren Werte von Joubert sind zu hoch, weil bei seiner Anordnung das druckerhöhende Ozon (s. u.) entstehen konnte). Das Leuchten des Phosphors tritt bei der Druckverminderung nicht unvermittelt auf, sondern wird durch intermittierendes Leuchten eingeleitet, das nach Centnerszwer etwa 50 mm oberhalb des Leuchtdruckes mit einer Periode von ca. 20 Sekunden einsetzt; wird der Druck weiter vermindert, so verkürzt sich die Periode, dann beginnen leuchtende Ringe über die Phosphorstange zu laufen und schließlich tritt kontinuierliches Leuchten auf.

Aus dem Angegebenen geht hervor, daß der maximale Leuchtdruck abhängig ist vom Feuchtigkeitsgrad, von der Anwesenheit bestimmter Stoffe, von der Temperatur.

Die Feuchtigkeit wirkt in doppelter Weise: einmal indem sie überhaupt einen Maximaldruck auftreten läßt und dann, indem sie die Entstehung des druckerhöhenden Ozons ermöglicht; hierzu ist nach Russell ein ziemlich beträchtlicher Feuchtigkeitsgrad nötig, bei Oxydation mit durch H_2SO_4 getrocknetem Sauerstoff findet keine Bildung von Ozon und Wasserstoffsuperoxyd statt. Die Wirkung des Ozons ist sehr stark; bei Anwesenheit von ganz geringen Mengen kommt Phosphor auch noch in Sauerstoff von Atmosphärendruck zum Leuchten. Da Ozon unter geeigneten Umständen ein Produkt der langsamen Oxydation ist, so findet eine autokatalytische Druckerhöhung statt. Eine andere autokatalytische Beeinflussung der Reaktion ist die Verminderung des Feuchtigkeitsgrades durch hygroskopische Oxydationsprodukte. Der Einfluß des Ozons wurde durch Versuche von Scharff deutlich erwiesen, der das Ozon mit Paragummi abfing. Bei Variation des Abstandes des Gummis vom Phosphor zeigte sich

bei einem Abstand von einigen Millimetern: Intermittierendes Leuchten;

bei einem Abstand von einigen Zentimetern: sofort permanentes Leuchten;

bei noch größerem Abstand: heftiger Verlauf.

Von den beeinflussenden Stoffen wirkt allein das Ozon druckerhöhend. Alle anderen wirksamen Stoffe setzen bei geringerer Konzentration den Leuchtdruck herab, bei höherer Konzentration verhindern sie das Leuchten vollständig. So wird z. B. durch 0,07 Volumprozente Jodbenzol der Leuchtdruck von 562 auf 337 mm herabgesetzt und schon Schönbein fand, daß bei Anwesenheit von Terpentinöldämpfen der Phosphor nicht leuchtet; auch muß hier an die Beobachtung von Boyle erinnert werden, daß bei Phosphorlösungen in Terpentinöl das Leuchten ausbleibt. Graham stellte dann quantitative Untersuchungen an und fand, daß bei Atmosphärendruck und 66° das Leuchten nicht auftrat, wenn auf 1 Volum der Stoffe Aether : Aethylen : Naphta : Terpentinöl 150:450:1820:4440 Volumina Luft kamen.

Centnerszwer bestimmte später folgende Reihenfolge zunehmender Wirksamkeit: Chloroform, Schwefelkohlenstoff, Aether, Aethylen, Oktan, Amylalkohol, Allylalkohol, Jodbenzol. Er findet Zunahme der Wirkung mit der Zahl der C-Atome, einen starken Einfluß der Doppelbindung, und ganz besondere Wirkung des Jods (während Cl und Br ziemlich einflußlos sind). Bei genügender Konzentration der Hemmstoffe kann Phosphor geschmolzen werden ohne zu leuchten.

Von Interesse sind die Versuche van't Hoffs: In einem verschlossenen Kolben befand sich Phosphor und eine Lösung von Indigo-Schwefelsäure; wurde der Kolben geschüttelt und dann auf eine Temperatur

von 50° gebracht, so erfolgte eine Leuchterscheinung, die sich nach einigen Stunden wiederholte, wenn man den Kolben sich selbst überließ, die aber beliebig oft und rasch wiederholt werden konnte, wenn man den Kolben jedesmal durchschüttelte. Van't Hoff nimmt ein hemmendes Oxydationsprodukt an, das in der Ruhe langsam, beim Schütteln rasch absorbiert wird; er hält es für möglich, daß man es mit geladenen Sauerstoffatomen zu tun hat. Eine Bestätigung findet er darin, daß mit Wasser allein keine Leuchterscheinung eintritt.

Für den Einfluß der Temperatur auf den Leuchtdruck wurden verschiedene Formeln aufgestellt; nach allen ist der Druck eine lineare Funktion der Temperatur, die Konstanten wechseln. Scharff gibt die Formel: $p = 22.14\ t + 136.35$. Hieraus berechnet man für 760 mm 28,6° (Davy fand 27°) und für die Temperatur, bei der überhaupt kein Leuchten mehr stattfindet —6°.

Durch die Untersuchungen von Thorpe und Tutton, von Jungfleisch und von Scharff ist die Frage des Phosphorleuchtens in ein neues Stadium getreten: diese Untersuchungen beziehen sich auf die Leuchterscheinungen bei der zweiten Stufe der Phosphoroxydation, bei der Oxydation des Phosphortrioxyds. Es zeigen sich hierbei die für die Phosphoroxydation charakteristischen Erscheinungen: Maximaler Sauerstoffdruck, intermittierendes Leuchten, Hemmung durch organische Dämpfe.

Ohne Zweifel ist das starke Leuchten bei der Phosphoroxydation fast ausschließlich auf die Oxydation des bei 22° schmelzenden und sehr flüchtigen Trioxyds zurückzuführen: die Flüchtigkeit des Phosphors ist hierfür bei gewöhnlicher Temperatur nicht genügend (Jungfleisch). Als Druckgrenze für das Leuchten des Trioxyds bei 20° werden von Scharff 420 mm angegeben. Wenn man hinzunimmt, daß nach Russell das starke Leuchten des Phosphors in trockenem Sauerstoff erst unterhalb 500 mm beginnt, so wird man sich vorstellen dürfen, daß zunächst unter schwachem Leuchten Trioxyd gebildet wird, das dann verdampft und das starke Leuchten ermöglicht.

Im einzelnen ist der Verlauf nach Scharff folgender: In Sauerstoff mit Spuren von Wasserdampf (in ganz trockenem findet kein Leuchten statt (vgl. oben) tritt bei Zimmertemperatur und 300 bis 400 mm Druck in größerer Entfernung von der Substanz ein Flämmchen auf, bei weiterer Druckverminderung glüht die ganze Substanz auf, bei Druckvermehrung wird der Prozeß rückläufig. Bei höherer Temperatur tritt direkt über der Substanz intermittierendes Leuchten auf, dessen Tempo mit steigender Temperatur schneller wird, während zugleich der Abstand von der Substanz abnimmt. Es handelt sich offenbar um ein Diffusionsphänomen: bei geeignetem Mischungsverhältnis tritt Entflammung ein. Das kontinuierliche Leuchten ist nur eine rasche Folge von einzelnen Entflammungen.

In diesem Zusammenhang sind auch die Arbeiten von Centnerszwer zu erwähnen, der die photographische Wirkung des Phosphorlichts untersuchte. Die photographische Platte war mit einer Bleischablone bedeckt und es ergab sich nun eine weit über die Ränder des ausgestanzten Buchstabens hinausgreifende Wirkung, während sie ganz ausblieb, wenn die Schablone mit einem Glimmerblättchen von 0,03 mm Dicke bedeckt oder ein Luftstrom zwischen Phosphor und Platte durchgesaugt wurde: man hat es also mit der Wirkung eines verdampfenden und diffundierenden Agens, des Phosphortrioxyds, zu tun. Dieses ist, wie die Ursache der Leitfähigkeit der Phosphorluft (s. u.), so auch in der Hauptsache der Ausgangspunkt des Phosphorleuchtens.

Oxydationsgeschwindigkeit. Während man bei den Leuchterscheinungen des Phosphors nur den maximalen Druck feststellen und außerdem das Leuchten als stark oder schwach bezeichnen kann, ist die veranlassende Oxydation einer genauen Messung zugänglich. Die Verhältnisse werden aber durch verschiedene Umstände kompliziert und die verschiedenen Beobachter sind zu ganz verschiedenen Resultaten gekommen; besonders besteht diese Verschiedenheit zwischen den Arbeiten von van't Hoff und Russell. Die Oxydation des Phosphors war ein bevorzugter Gegenstand der Untersuchungen van't Hoffs über die chemische Reaktionsgeschwindigkeit, es scheint aber nach den Arbeiten Russells von seinen Ergebnissen fast nur die Tatsache eines Maximaldrucks in feuchtem Sauerstoff übrig zu bleiben.

Van't Hoff und sein Schüler Ewan fanden, daß in feuchter Luft die Oxydation erst unterhalb 700 mm beginnt, daß die Geschwindigkeit dann rasch ansteigt, über ein größeres Druckintervall nahezu konstant bleibt und schließlich wieder rasch abfällt: durch Zurückführung auf konstante Phosphorkonzentration (Berücksichtigung der mit abnehmendem Druck zunehmenden Verdampfungsgeschwindigkeit) wurde bis 520 mm Proportionalität mit dem Sauerstoffdruck erhalten; dann aber würde eine Hemmung auftreten, die einen raschen Abfall bewirkt.

Mit trockenem Sauerstoff erhielt Ewan erst unterhalb 200 mm Reaktion von sehr geringer Geschwindigkeit, die bei ganz niederen Drucken (bis zu ca. 70 mm) proportional der Quadratwurzel aus dem Druck anstieg und dann rasch abfiel. Hieraus schloß van't Hoff auf eine semi-

molekulare Reaktion und nahm einen Zerfall der Sauerstoffmolekel in geladene Atome an. In der elektrischen Ladung glaubte er vielleicht eine Erklärung für die Oxydationshemmung und die periodischen Leuchterscheinungen sehen zu dürfen, die er bei dem oben erwähnten Versuch beobachtete.

Dem gegenüber ergaben die Beobachtungen Russells ein ganz anderes Bild. Russell fand: 1. Zur Phosphoroxydation ist etwas Feuchtigkeit unbedingt nötig.[1]) Das Optimum liegt bei dem Feuchtigkeitsgehalt, der beim Trocknen mit konzentrierter H_2SO_4 zurückbleibt; mehr wirkt verzögernd.

2. Die Bildung von Ozon und Wasserstoffsuperoxyd findet nur bei reichlichem Wassergehalt statt, nicht bei Verwendung von mit H_2SO_4 getrocknetem Sauerstoff (bei den Versuchen von van't Hoff konnte sich das druckerhöhende Ozon bilden).

3. Mit mäßig getrocknetem Sauerstoff reagiert Phosphor unter allen Drucken (in den Versuchen bis zu 3 Atmosphären), die Erscheinungen des „falschen Gleichgewichts" konnten nicht beobachtet werden.

Daß van't Hoff-Ewan auch bei trockenem Sauerstoff ein Maximum fanden, erklärt sich aus der großen Empfindlichkeit der Phosphoroxydation gegen Oberflächenverunreinigung. Als bei einem Versuch ein Phosphor verwendet wurde, bei dessen Destillation etwas Rohmaterial in die Vorlage übergegangen war, blieb die Oxydation aus; sie trat aber ein, nachdem das Rohr kurz geöffnet worden war, vielleicht infolge einer Oberflächenerneuerung durch die Erschütterung bei dem Gasaustritt.

Die Reaktion verläuft in zwei Stadien: zunächst ist sie langsam (von einem schwachen Leuchten begleitet) und die Geschwindigkeit ist dem Druck direkt proportional; sinkt der Druck aber unter 500 mm, so findet ein rasches Ansteigen der Geschwindigkeit statt (mit starkem Leuchten verbunden).

4. Die Oxydation mit feuchtem Sauerstoff unterscheidet sich von der mit trockenem in folgenden Punkten:

a) Die Oyxdation beginnt nicht, bevor der Druck unter 500 mm gefallen ist, und ist besonders im Anfang stark verzögert.

b) Es bildet sich Ozon und Wasserstoffsuperoxyd, bei Gegenwert von Stickstoff (Luft) Ammonnitrit und -nitrat.

Nach Russell stellt die Oxydation mit trockenem Sauerstoff den normalen Verlauf dar, der durch Wasser in ganz äußerlicher Weise durch Ausbildung eines schützenden Ueberzugs verändert wird. Russell schließt dies aus den folgenden Beobachtungen:

1. Eine chemische Einwirkung von Wasser auf Phosphor findet nicht statt (Wasserdampf mit Phosphor eingeschlossen zeigt keine Druckänderung).

2. Eine spezifische Wirkung des Wassers liegt nicht vor (bei 4 mm H_2O-Tension derselbe Verlauf wie mit nahezu trockenem Sauerstoff).

3. Die Annahme einer Wasserhaut wird dadurch nahegelegt, daß der Reaktionsverlauf bei einem Versuch mit feuchtem Sauerstoff nach Anschluß eines Trockenrohres ($CaCl_2$) erst nach geraumer Zeit in den für trockenen Sauerstoff charakteristischen übergeht (nachdem die Wasserhaut verdunstet ist!); umgekehrt muß, wenn man von trockenem Phosphor ausgeht, die Feuchtigkeit Zeit gehabt haben zu wirken. Ein weiterer Beweis liegt darin, daß das Leuchten nicht über die ganze Oberfläche hin zugleich beginnt, sondern an einzelnen Stellen (wo die Wasserhaut zuerst verschwindet).

Maximaler Oxydationsdruck von Phosphor in trockenem Sauerstoff	Maximaler Oxydationsdruck von Phosphor in feuchtem Sauerstoff	Maximaler Leuchtdruck von Phosphor in feuchtem Sauerstoff	Maximaler Leuchtdruck von Phosphortrioxyd in feuchtem Sauerstoff
202 mm bei 20°; mit P_2O_5 getrocknet (Ewan)	697 mm, 671 „ bei 20°; 16 bis 18 mm H_2O-Druck (Ewan)	787 mm, 600 „ bei 20° (Joubert)	420 mm bei 20° Spuren von H_2O-Dampf (Scharff)
Grenze nicht vorhanden. Von 2000 mm ab geringe Oxydation mit schwachem Leuchten, von 500 mm ab beschleunigte Reaktion mit starkem Leuchten; mit konz. H_2SO_4 und $CaCl_2$ getrocknet, bei ca. 13 bis 14° (Russell)	336 mm bei 19° 16 mm H_2O-Druck; 467 mm bei 9°, 404 „ „ 11° 4 mm H_2O-Druck (Russell)	538 mm bei 9,3°, 580 „ „ 11,5°, 495 „ „ 11° (Joubert)	
		567 mm bei 20° (Centnerszwer)	
		570 mm bei 20° (Scharff)	

Bei der Oxydation des Phosphors wird für jedes oxydierte P-Atom, unabhängig davon, ob P_2O_3 oder P_2O_5 entsteht, ca. ½ Atom Sauerstoff (genauer 0.6) „aktiviert" (Ozon- und H_2O_2-Bildung). Die Abweichung

[1]) Dies hatte auch Baker gefunden, der deshalb die Atomgewichtsbestimmung durch Verbrennen von Phosphor in „trockenem" Sauerstoff beanstandete.

erklärt sich vielleicht durch die nebenhergehende Bildung von unterphosphoriger Säure mit einem anderen Aktivierungskoeffizienten.

Die Leitfähigkeit der Phosphorluft. Bei der Oxydation des Phosphors findet eine Ionisation der Luft statt und zwar entstehen beide Elektrizitäten, ein Elektroskop wird sowohl bei positiver wie bei negativer Ladung entladen. Die Phosphorluft zeigt auch das Dampfstrahlphänomen (Kondensation von Wasserdampf).

Daß die Ionisation ursächlich mit der Oxydation verknüpft ist, geht daraus hervor, daß bei Verhinderung der Oxydation (durch Verminderung des Druckes oder Zusatz organischer Dämpfe) auch keine Leitfähigkeit auftritt. Ist dagegen die Ionisation eingetreten, so kann sie durch die organischen Dämpfe (Terpentinöl) nicht mehr ganz genommen werden; diese verhindern also nur die Entstehung der die Leitfähigkeit verursachenden Substanz. Als diese ist nach den Untersuchungen von Schenck das Phosphortrioxyd anzusehen: auch reines Trioxyd ionisiert stark; weiterhin ergibt zwar die Oxydation von hellrotem Phosphor mit Ozon ebenfalls Leitfähigkeit, dagegen nicht die Oyxdation irgendeines anderen Stoffes, auch wenn sie unter ganz ähnlichen Umständen erfolgt. So tritt z. B. bei der Oxydation das Bromacetylens (C_2HBr) Ozon und Phosphorgeruch auf, aber keine Leitfähigkeit; ebenso bei Triäthylphosphin.

$\delta\delta$) Physiologische Wirkung. Phosphor bildet mit Arsen und Antimon zusammen eine toxikologisch einheitliche Gruppe; das Gemeinsame liegt darin, daß alle 3 Elemente starke Protoplasmagifte sind. Die Organe, an denen sich die Phosphorvergiftung vor allem äußert, sind die Leber, die Nieren, das Knochensystem (Phosphornekrose des Unterkiefers). Genaueres findet man in dem Artikel „Gifte" Bd. V, S. 22. — Interessant ist, daß Phosphor auch ein „Katalysatorgift" ist (s. S. 544).

6b) Roter Phosphor. α) Entstehungsweisen. Aus dem weißen Phosphor entsteht auf verschiedene Weise eine rote Substanz, die in ihren Eigenschaften völlig vom weißen Phosphor abweicht, bei chemischen Umsetzungen aber durchaus dieselben Produkte ergibt wie dieser und sich somit als eine andere Modifikation des Phosphors erweist. Die Umwandlung wird durch physikalische und chemische Agentien bewirkt (Erhitzen, Belichtung, Einwirkung von Ammoniak), sie erfolgt im Schmelzfluß, in Lösung und im Gaszustand; je nach der Darstellunsweise erhält man Produkte von einer gewissen Variationsbreite der Eigenschaften. Es geht daraus hervor, daß man es nicht mit einer einheitlichen Modifikation zu tun hat, doch empfiehlt es sich aus praktischen Gründen bis zur Klärung der Verhältnisse die Modifikation „roter Phosphor" beizubehalten.

$\alpha\alpha$) Entstehung durch Erhitzen. 1. Aus dem Schmelzfluß. Auf diesem Wege wurde der rote Phosphor 1845 von Schrötter dargestellt, er ist aber sicher schon von Berzelius beobachtet worden. Die Umwandlung in Schmelzfluß beginnt merklich zu werden bei 240°, bei 310° (siedendes Diphenylamin) ist sie am besten zu beobachten, bei höheren Temperaturen wird sie explosionsartig heftig; es entwickeln sich ca. 4 Cal. pro g-Atom. Verschiedene Stoffe wirken beschleunigend, z. B. Jodphosphor (P_2J_4) und Selen, und die Umwandlung findet dann bei viel niedrigeren Temperaturen statt: Beginn bei 140°, gut meßbarer Verlauf bei 170°. Löst man Phosphor in eben geschmolzenem Jodphosphor (110°) auf, so geht die Umwandlung momentan vor sich; bei gleichen Teilen PBr_3 und P_2J_4 findet die Reaktion auf dem Wasserbad statt (PCl_3 ist ohne Wirkung!).

2. Umwandlung in Lösung. Mit den zuletzt angegebenen Methoden ist schon der Uebergang zu der Umwandlung in Lösung gemacht. Diese wurde besonders von Schenck studiert; sie führt zu dem hellroten („Schenckschen" Phosphor). Am besten eignet sich als Lösungsmittel PBr_3, das auch katalysierend wirkt: eine 1% Lösung zeigt nach längerem Erhitzen bei 150° schon eine deutliche Abscheidung von rotem Phosphor, die günstigste Temperatur ist bei 170 bis 190°. Stärker katalysierend wirken Jodphosphor und Selen. Durch einen geringen Zusatz von Jodphosphor wird die Geschwindigkeitskonstante (s. unten) auf das 3-fache erhöht. Charakteristisch für die Darstellung aus Lösung ist das Mitreißen von Lösungsmittel, das allgemein beim Niederschlagen von amorphen Substanzen gefunden wird (auch der aus CS_2- oder CCl_4-Lösung durch Belichtung erhaltene rote Phosphor enthält Einschlüsse dieser Lösungsmittel, Lösungen von Phosphor in P_2J_4 oder P_4S_3 ergeben jod- und schwefelhaltige Produkte). Je tiefer die Bildungstemperatur ist, desto mehr Lösungsmittel hält der rote Phosphor eingeschlossen:

Bildungstemperatur	100 P enthalten PBr_3
218°	23,0
185°	27,1
140°	36,3
ca. 30° (im Licht)	47,0

Die Einschlüsse können durch Auskochen mit indifferenten Lösungsmitteln (CS_2, CCl_4) nicht entfernt werden; beim Auskochen mit Wasser wird das Tribromid in phosphorige Säure umgewandelt, die aber ebenfalls sehr fest gehalten wird; es ist nicht möglich ein Produkt von mehr als 90% Phosphor zu erhalten. Man hat es mit festen Lösungen oder Gelen mit großem

Adsorptionsvermögen zu tun. — Colson findet für die Geschwindigkeit der Umwandlung die Konzentration als maßgebenden Faktor, außerdem gibt er an, daß stets etwas PH_3 entstehe und daß die Reaktion durch PH_3 katalytisch beschleunigt werde (Autokatalyse); in oxydierenden Lösungsmitteln soll keine Umwandlung eintreten.

3. Umwandlung im Gaszustand. Die interessanteste thermische Umwandlung des weißen Phosphors in roten ist die über den Gaszustand. Während auf mittlere Temperaturen erhitzter Phosphordampf sich bei der Abkühlung als weißer Phosphor kondensiert, gelingt es durch starke Erhitzung (900°) und rasche Abkühlung die Bildung von rotem Phosphor zu veranlassen. Schon Hittorf hatte diese Bemerkung gemacht. Er erhielt roten Phosphor aus dem Gaszustand auf verschiedenen Wegen: beim Durchfunken von Phosphordampf; beim Glühendmachen eines Kohlenstabs in 255° warmem Phosphordampf; beim Durchleiten von mit Phosphordampf beladenem Wasserstoff durch ein zur Hälfte weißglühendes Porzellanrohr in der kälteren auf 360° gehaltenen Hälfte. Bei der schnellen Abkühlung eines Phosphordampf enthaltenden luftleeren hoch erhitzten Glasrohres entstand „nur eine Spur roten Phosphors, die sich in einer gelblichen Färbung der kondensierten Tropfen äußerte". Hittorf zog keine weiteren Schlüsse aus seinen Beobachtungen und diese selbst gerieten in Vergessenheit. Neu aufgefunden wurde die Tatsache durch Stock; es wurden die genauen Bildungsbedingungen festgestellt und die Erscheinung wurde zu der Dissoziation des Phosphordampfs in Beziehung gebracht. Es wurde folgender Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Zustand des Kondensats gefunden:

Temperatur	Zustand des Kondensats
400°	ganz farblos.
450°	eben merkliche Gelbfärbung.
550°	sehr deutliche Gelbfärbung.
600°	bräunliche Flecken.
700°	starker braunroter Niederschlag.
900 bis 1175°	immer stärkerer Niederschlag; die Flüssigkeit wird undurchsichtig.

Das Licht ist bei der Umwandlung unbeteiligt: weißer Phosphor zeigte, wenn er in einem von Wasser durchströmten Glasrohr in einen auf 900° erwärmten Heräusofen gebracht wurde, keine Veränderung. Die notwendige Dauer des Erhitzens ist gering: 5 Minuten genügen; dagegen ist rasche Abkühlung von der größten Wichtigkeit (sie wird am besten durch Eintauchen eines Endes des Versuchsröhrchens in kaltes Wasser bewirkt): wurde mit dem Abschrecken des 700° warmen Rohres 2 Sekunden gewartet, so entstand sehr wenig roter Phosphor, ließ man an der Luft erkalten, so kondensierte sich fast aller Phosphor farblos. Beim raschen Abkühlen von 1000° warmem Dampf konnte etwa $^1/_3$ des Phosphors als rote Modifikation erhalten werden. Die Trennung wird bewirkt, indem man das freie Ende des Röhrchens in flüssige Luft taucht, wobei der weiße Phosphor dorthin destilliert, während der rote zurückbleibt. Wie die Tabelle S. 543 zeigt, findet mit steigender Temperatur ein zunehmender Zerfall der P_4-Molekeln in P_2-Molekeln statt; diese müssen durch plötzliche Abkühlung über das Temperaturgebiet rascher Wiedervereinigung weggebracht werden, worauf dann bei tieferer Temperatur die Bildung der komplexen Molekeln des roten Phosphors stattfindet. — Es ist noch die interessante Beobachtung von Arctowski zu erwähnen, der fand, daß roter Phosphor auf dem Wasserbad ein Sublimat von rotem Phosphor liefert. Während also bei höherer Temperatur roter und weißer Phosphor denselben Dampf von P_4-Molekeln ergeben, hätte man bei Wasserbadtemperatur im Dampf die Molekeln des roten Phosphors in wahrem oder in falschem Gleichgewicht. — Die Umwandlung des P-Dampfes in roten Phosphor wird durch schon vorhandenen roten Phosphor, also auch autokatalytisch, beschleunigt.

ββ) Umwandlung durch Licht. Außer durch Erwärmung wird die Umwandlung des weißen Phosphors in roten auch durch Belichtung bewirkt; die Bildung erfolgt im isolierten, festen oder flüssigen Zustand oder in Lösung, dagegen zeigt Phosphordampf bis zu 200° keine Einwirkung (Stock).

Die Wirksamkeit der Lichtstrahlen beginnt im mittleren Blau, erreicht das Maximum im Violett und erstreckt sich mit stark verminderter Intensität etwas ins Ultraviolett (Stock). Wirksam ist also vor allem der dem Ultraviolett benachbarte Teil des Spektrums, der auch vom gewöhnlichen Phosphor absorbiert wird, wie es sich nach der bekannten Regel erwarten läßt. Der Einfluß der Temperatur ist wie bei den meisten photochemischen Reaktionen sehr gering, auch bei der Temperatur der flüssigen Luft findet noch Rotfärbung statt.

In den ersten Stadien der Umwandlung färbt sich der weiße Phosphor zuerst gelb, dann rot, bleibt aber durchsichtig. Später wird er undurchsichtig und mehr oder weniger braun und rot. Es entsteht zunächst eine kolloidale Lösung, die dann ausflockt.

Siedentopf hat die Umwandlung im Kardioid-Ultramikroskop bei 1500-facher Vergrösserung beobachtet und beschreibt die Erscheinungen etwa wie folgt: Fast momentan nach der Belichtung treten in dem dunklen Seh-

felde weiße submikroskopische Pünktchen auf, im geringen Abstand von eta $^1/_2$ μ. Die Helligkeit dieser Teilchen nimmt infolge ihres Wachstums (vielleicht Lumineszenz) rapid zu, so daß man durch ein Kobaltglas beobachten muß. Man kann leicht erkennen, wie sich die weißen Teilchen sämtlich in rote umwandeln. Die farbige Umwandlung des Phosphors erfolgt also erst nach Bildung einer kolloidalen Phase. . . Im weiteren Verlaufe überzieht sich das Sehfeld mit einem feinen Geflecht rotfarbiger Maschen, innerhalb deren das Sehfeld dunkel bleibt. Auch in hoch konzentrierter CS_2-Lösung kann der Vorgang beobachtet werden.

Die Umwandlung durch Licht wird ebenso wie die durch Wärme durch Katalysatoren beeinflußt und zwar sind es dieselben in beiden Fällen.

Als Lichtquelle kann direktes oder zerstreutes Tageslicht, die Quarzquecksilberlampe oder der elektrische Funke verwendet werden, doch sind selbst starke Induktionsfunken nur wenig wirksam.

$\gamma\gamma$) Umwandlung durch Ammoniak. Eine eigenartige Entstehungsweise des roten Phosphors wurde von Stock entdeckt, als er die Einwirkung des Ammoniaks auf weißen Phosphor studierte. Er fand, daß bei der Einwirkung von flüssigem Ammoniak die zunächst ins Auge fallende Erscheinung, die Schwarzfärbung (s. S. 558) — nur eine Nebenreaktion ist, und daß das Reaktionsprodukt hauptsächlich aus rotem Phosphor besteht.

β) Die Eigenschaften des roten Phosphors. $\alpha\alpha$) Physikalische Eigenschaften. — Aussehen. Auch beim Erwärmen oder Belichten des isolierten Phosphors scheiden sich die ersten Teile mit der gelben oder hellroten Farbe aus, wie sie die Präparate aus Lösung immer zeigen: dies ist offenbar die Farbe des feinverteilten roten Phosphors. Mit steigender Temperatur werden immer dunklere und dichtere Präparate erhalten; die hocherhitzten Produkte werden als rotlichbraun, schokoladebraun, graphitähnlich, violett-schwarz bezeichnet.

Struktur, Härte, Dichte. Der hellrote Phosphor wird allgemein als amorph angesehen, als feste Lösung mit den eingeschlossenen fremden Substanzen, als Gel. Besonders das starke Absorptionsvermögen weist auf den amorphen Zustand hin. Ob der gewöhnliche rote Phosphor amorph oder kristallinisch ist, ist noch nicht mit Sicherheit festgestellt. Es wird zwar von den meisten Autoren auf Grund der Doppelbrechung (Aufhellung des Gesichtsfeldes zwischen gekreuzten Nicols) kristalline Struktur angenommen, doch ist dieser Beweis nicht zwingend, da diese Erscheinung auch durch Micellarstruktur amorpher Substanzen (Gespinstfasern) hervorgerufen werden kann; aus den Beobachtungen von Siedentopf mit dem Ultramikroskop (s. oben) geht aber hervor, daß der durch Belichtung gebildete rote Phosphor anfänglich Wabenstruktur besitzt und es ist wohl möglich, daß eine zellige Struktur erhalten bleibt und auch bei den durch Erhitzen gebildeten Produkten vorliegt, da auch diese durch eine kolloidale Phase gehen. — Als Härte gibt Schrötter für den roten Phosphor 3,5 an, er ist also härter als Kalkspat.

Die Dichte der nach den verschiedenen Methoden erhaltenen Präparate schwankt außerordentlich. Die geringste Dichte (2,02) zeigt der aus Lösung erhaltene Schencksche Phosphor und der durch Ammoniakeinwirkung hergestellte, der gewöhnliche aus dem Schmelzfluß gewonnene Handelsphosphor hat 2,17 bis 2,19. Die Dichtebestimmungen bei den hellroten Präparaten haben natürlich teils wegen der Einschlüsse teils wegen der Wabenstruktur keine große Bedeutung. Durch andauerndes Erhitzen über 300° nähern sich die hellroten Varietäten in ihrem Aussehen und in ihren Eigenschaften den Handelsprodukten, bei längerem Erhitzen auf 400 bis 500° gehen alle Präparate allmählich in Hittorfschen Phosphor über.

Eine Rückverwandlung in weißen Phosphor durch Erschütterung und Verreiben findet nicht statt (wichtig für den Transport).

Löslichkeit. In der Löslichkeit zeigt der rote Phosphor ein vom weißen Phosphor völlig abweichendes Verhalten, er ist in dessen Lösungsmitteln fast unlöslich. In PBr_3 löst sich Handelsphosphor etwas, größer ist die Löslichkeit von hellrotem: von diesem lösen sich in 100 g PBr_3 bei 172° 0,2601 g, bei 184° 0,3634 g. Auch in Isobutylalkohol ist roter Phosphor merklich löslich.

Thermische Eigenschaften. — Spezifische Wärme. Die spezifische Wärme ist kleiner als die der weißen Modifikation: sie beträgt zwischen 15° und 98° 0,1705 (Atomwärme 5,26).

Verbrennungswärme. Die Verbrennungswärme ändert sich kontinuierlich mit der Herstellungstemperatur der Präparate.

Dampfdruck. Der Dampfdruck beträgt bei:

358°	447°	530°
31,5	1636	6139 mm.

Der rote Phosphor kann also unter Atmosphärendruck nicht geschmolzen werden.

Schmelzpunkt: Der rote Handelsphosphor und auch der von Stock hergestellte hellrote Phosphor schmelzen unter Druck nach vorhergehendem Sintern bei 600 bis 615° zu einer gelblichen Flüssigkeit, aus der sich beim Abkühlen erst bei 550° rote Tafeln abscheiden (vgl. S. 553).

Der rote Phosphor erscheint gegenüber dem weißen als die stabile Modifikation von geringerer freier Energie, geringerem Dampfdruck und geringerer Löslichkeit.

ββ) Chemische Eigenschaften. Der gewöhnliche rote Handelsphosphor unterscheidet sich in seinem chemischen Verhalten völlig vom weißen durch seine große Reaktionsträgheit. Er oxydiert sich und leuchtet nur in Ozon und nur schwach; die Entzündungstemperatur liegt sehr hoch (aber viel tiefer als gewöhnlich angegeben wird): bei 430 bis 440°; außerdem ist es wahrscheinlich, daß dabei sich gar nicht der rote Phosphor entzündet, sondern Dämpfe von weißem: bei 380° beginnt der rote Phosphor zu leuchten und zu rauchen, es entwickeln sich Dämpfe, die mit denen des weißen Phosphors identisch sind. Mit Natronlauge findet keine Reaktion statt. — Ganz anders ist das Verhalten des hellroten Phosphors. Dieser ist sehr reaktionsfähig; er löst sich in Alkalien und die Reaktion ist sogar heftiger als mit weißem Phosphor (feinere Verteilung!); es wird nichtentzündlicher Phosphorwasserstoff entwickelt und Wasserstoff freigemacht. Mit Ammoniak, Piperidin und anderen organischen Basen tritt eine charakteristische Schwarzfärbung ein, die auf Bildung von Salzen des festen Phosphorwasserstoffs P_9H_2 beruht (s. unten). Hellroter Phosphor fällt aus Kupfersulfatlösung metallisches Cu, Indigo wird beim Kochen entfärbt. Die größere Reaktivität des hellroten P kann genügend durch seinen feinen Verteilungszustand erklärt werden (auch andere amorphe Stoffe zeigen einen solchen Unterschied gegenüber der kristallinen Form; gelbes und rotes HgO).

Physiologisches Verhalten. Ein besonders wichtiger Unterschied des roten Phosphors vom weißen ist seine völlige Ungiftigkeit in allen seinen Formen, auch in der des chemisch so reaktiven hellroten. Diese Eigenschaft läßt den hellroten Phosphor als einen geeigneten Ersatz des vom Gesetz für die Fabrikation der Zündhölzer verbotenen weißen Phosphors erscheinen.

7c) Hittorfscher (metallischer) Phosphor. α) Darstellungsmethoden. Der Hittorfsche Phosphor, der neben dem weißen Phosphor die einzige wohldefinierte Phosphormodifikation ist, stellt das Endprodukt bei der Erhitzung aller übrigen Formen des Phosphors dar. Von Hittorf wurde sie auf verschiedenen Wegen erhalten: 1) durch längeres Erhitzen des gewöhnlichen Handelsphosphors über 400°; die Dichte stieg dabei von 2,14 bis 2,19 und 2,33; 2) durch Lösen in geschmolzenem Blei und Erhitzen auf dunkle Rotglut — beim Abkühlen scheiden sich Phosphorkristalle aus, die durch HNO_3 von dem Blei getrennt werden (Darstellungsmethode); 3) durch Sublimieren von rotem Phosphor in einem geschlossenen Rohr, das zum Teil auf 520° (P_2S_5-Dampf), zum Teil auf 440° (Schwefeldampf) gehalten wurde.

Die Hittorfsche Methode der Darstellung aus Bleilösung wurde von Stock in verschiedener Weise verbessert. Er fand eine höhere Erhitzung (800°) vorteilhaft und löste das Blei nicht wie Hittorf durch Salpetersäure, sondern durch anodische Oxydation, wobei der Phosphor weniger angegriffen und die Ausbeute verbessert wird (man erhält den Phosphor so nicht bleifrei, das Minimum waren 1,5% Blei). Durch Kristallisation aus dem Schmelzfluß entsteht Hittorfscher Phosphor nicht.

β) Eigenschaften. Aus der Bleilösung werden mehr oder weniger durchsichtige rötlich-violette monokline Kristalle erhalten, deren Dichte unter Berücksichtigung des Bleigehaltes 2,31 bis 2,33 beträgt. Der Hittorfsche Phosphor schmilzt etwas höher als der gewöhnliche rote, bei 620 bis 625°. Der Dampfdruck ist viel geringer als der des roten:

358°	447°	530°
sehr klein	928	4130 mm

Die chemische Reaktionsträgheit ist beim Hittorfschen Phosphor noch gesteigert.

6d) Die Theorien der Phosphorallotropie. Das im Vorhergehenden gegebene Material ist von der Theorie in mehr oder weniger radikaler Weise verarbeitet worden, meist unter Anwendung des Schemas der pseudobinären Systeme, wodurch beim Schwefel eine so überraschende Aufklärung erreicht wurde. Beim Phosphor sind die Verhältnisse aber noch nicht geklärt und es stehen sich zwei Richtungen gegenüber, von denen die eine sich mehr an das experimentell Sichergestellte hält (Stock), während die andere das erwähnte Schema vielleicht oft ohne genügende Grundlage anwendet (Cohen und Olie). Den hauptsächlichsten Gegenstand der Spekulation bildet natürlich der „rote" Phosphor mit seiner wechselnden Erscheinungsform: Cohen und Olie sehen darin feste Lösungen von weißem und Hittorfschem Phosphor, welche als die wohldefinierten Endzustände gelten; Stock neigt mehr dazu mehrere rote Modifikationen anzunehmen, die untereinander feste Lösungen bilden; endlich geben Smits und de Leeuw für die Theorie die experimentell festgestellten Modifikationen überhaupt auf, sie operieren mit α- und β-Phosphor, aus denen sie nach einem Diagramm mit Gleichgewichts- und Entwickelungslinien (s. die Artikel „Chemisches Gleichgewicht" und „Legierungen") die verschiedenen Modifikationen entstehen lassen. Außer diesen Mischungsproblemen sind noch die weiteren Fragen zu diskutieren, in welchem Verhältnis die aktive weiße Form zu den trägen roten Formen steht, ob physikalische Isomerie (Polymorphie) oder chemische Isomerie (Polymerie oder Metamerie) vorliegt, und ob auch im flüssigen und gasförmigen Zustand Isomerie besteht.

α) Isomerie im Gaszustand. Es existieren mindestens zwei polymere Molekelarten: P_4 und P_2 (vgl. S. 544).

β) Isomerie im flüssigen Zustand. Weißer Phosphor schmilzt bei 44⁰, die kritische Temperatur liegt nach Ramsay bei etwa 420⁰, die rote Modifikation[1]) schmilzt über 600⁰. Wenn die kritische Temperatur zu Recht besteht, so hätte man also zwei verschiedene Schmelzen. Doch ist die Bestimmung der kritischen Temperatur aus der Oberflächenspannung beim Phosphor so vielen Bedenken ausgesetzt (vgl. S. 543), daß man darin kein Hindernis für die Annahme einer gleichen Schmelze beider Modifikationen zu sehen brauchte. Die Schmelze des weißen Phosphors wäre dann als die unterkühlte Schmelze des roten Phosphors anzusehen, die beiden Modifikationen wären monotrop polymorph. Aus anderen Beobachtungen ergibt sich aber, daß die beiden Formen im Verhältnis der Polymerie stehen und daß in der Schmelze ein dynamisches Gleichgewicht besteht, das sich mit der Temperatur verschiebt (Stock und Gomolka fanden, daß die Schmelzen des roten Phosphors nach dem Erstarren immer weißen Phosphor enthielten).

γ) Isomerie im festen Zustand. *αα*) Allgemeines über die Art der Phosphorallotropie. Das Verhältnis der beiden Modifikationen[1]) wurde früher als Polymorphie (Monotropie) aufgefaßt, doch ist diese Auffassung wohl allgemein verlassen. Dagegen spricht vor allem, daß die für polymorphe Umwandlungen charakteristische Auslösung der stabilen Form durch Einimpfen von Kristallisationskeimen beim weißen Phosphor noch nicht gelungen ist; weiterhin spricht dagegen die große Umwandlungswärme (ca. 4 Cal. pro g-Atom) und die Wirkung des Lichts: beides wird sonst nur bei chemischen Umlagerungen beobachtet. Wenn die Verschiedenheit der Schmelzen bewiesen wäre, so wäre dies natürlich ein entscheidender Beweis gegen Polymorphie. Doch liegt schon ein anderer sicherer Beweis dafür vor, daß den beiden Modifikationen verschiedene Molekeln entsprechen, in den Beobachtungen von Stock bei der Abkühlung hocherhitzter Phosphordämpfe (s. S. 549): dem weißen Phosphor entspricht die Molekel P_4, dem roten ein Polymerisationsprodukt des Spaltstücks P_2.

ββ) Die Theorie von Cohen und Olie. — Cohen und Olie fassen den roten Phosphor als pseudobinäres System (feste Lösung) aus weißem und Hittorfschem Phosphor auf. Sie stützen sich teils auf eigene Versuche, besonders aber auf lange zurückliegende Beobachtungen von Troost und Hautefeuille und von Lemoine.

Dichtemaximum als Temperaturfunktion. Als Cohen und Olie Phosphorpräparate von geringerer Dichte (geschlämmten Handelsphosphor [2,19 – 2,23] und Hittorfschen (?!) Phosphor aus Bleilösung [2,20] — !? —) längere Zeit auf höhere Temperatur erhitzten, um ihn, wie erwähnt, auf eine höhere Dichte zu bringen, machten sie eine interessante Beobachtung: es trat zwar zunächst ebenfalls eine Zunahme der Dichte bis 2,32 (2,34), dann aber ein Rückgang ein und es wurde ein Endzustand erreicht, der bei 550⁰ niedriger lag als bei 450⁰:

Temperatur	Wasser der Erhitzung Std.	s. G.	Beobachter	Ausgangsmaterial
215 bis 218⁰	100	2,19 (1)	C. u. O.	Hittorfscher (?!) Phosphor 2,19
255⁰	116	2,19 (9)	C. u. O.	Hittorfscher (?!) Phosphor 2,19
265⁰	650	2,148	T. u. H.	weißer Phosphor
357⁰	120	2,223	C. u. O.	H. P.
360⁰	540	2,19	T. u. H.	w. P.
450⁰	120	2,28 bis 2,30	C. u. O.	H. P.
500⁰	—	2,203	T. u. H.	w. P.
550⁰	120	2,24 (9)	C. u. O.	H. P.

C. u. O. = Cohen und Olie.
T. u. H. = Troost und Hautefeuille; diese Angaben fügen sich gut in die Tabelle ein.
H. P. = Hittorfscher (metallischer) Phosphor —?!
w. P. = weißer Phosphor.

Bei längerem Erhitzen auf höhere Temperaturen wird also bei 450 bis 500⁰ ein Maximum der Dichte von 2,28 bis 2,29 erreicht.

Dieser experimentelle Befund wird von Cohen und Olie so gedeutet, daß bei dieser Temperatur der Gehalt der festen Lösung an dem spezifisch leichteren weißen Phosphor ein Minimum erreicht. Die Verschiedenheit der Kristallform bei weißem und Hittorfschem Phosphor ist kein Grund gegen die Annahme einer festen Lösung; nach Tammann zwingt in solchen Fällen der eine Bestandteil dem anderen seine Kristallform

[1]) Hier ist die zweifelhafte Form des gewöhnlichen roten Phosphors und der Hittorfsche Phosphor zusammengefaßt.

auf. Wichtig ist, daß eine Umkehr der Erscheinung nicht gelang: Präparate von höherer Dichte zeigten beim Erhitzen auf niedrigere Temperaturen keine Abnahme mit Ausnahme eines einzigen nicht reproduzierbaren Falles. Es ist also zweifelhaft, ob Gleichgewichte vorliegen.

Ein weiterer interessanter Befund ist folgender: Cohen und Olie fanden bei diesen Versuchen, daß ihr Material bei 450⁰ gesintert, bei 550⁰ geschmolzen war, während Stock als Schmelzpunkt des roten Phosphors 600 bis 615⁰, des Hittorfschen 620 bis 625⁰ und Chapman für den roten 630⁰ angibt. Nach Cohen und Olie ist bei diesen Bestimmungen mehr oder weniger genau der „wahre“ Schmelzpunkt des Hittorfschen Phosphors festgestellt worden, nachdem der vorhandene weiße wegdestilliert war; bei den oben erwähnten Versuchen dagegen konnte sich das Gleichgewicht einstellen und es wurde der „natürliche“ Schmelzpunkt bestimmt (vgl. die Verhältnisse beim Schwefel (Bd. VIII, S. 577 ff.).

Dampfdruck. Eine weitere Unterstützung erfährt die Theorie von Cohen und Olie durch die Dampfdruckerscheinungen.

Als Troost und Hautefeuille die Dampfdrucke des weißen Phosphors bestimmten, fanden sie nicht einen plötzlichen Abfall von dem hohen Druck des weißen Phosphors zu dem geringen des roten Phosphors, sondern einen allmählichen Uebergang zu einem Endwert, den sie als „Umwandlungsdruck“ bezeichneten: Dieser Verlauf findet durch die Annahme einer festen Lösung und Dampfdruckerniedrigung durch den gelösten Hittorfschen Phosphor die einfachste Erklärung:

Temperatur	Druck des weißen Phosphors Atm.	Umwandlungsdruck Atm.
360⁰	3,2	0,12
440⁰	7,5	1,75
487⁰	—	6,8
494⁰	18,0	—
503⁰	21,9	—
510⁰	—	10,8
511⁰	26,2	16,0
531⁰	—	31,0
550⁰	—	56,0

Weiterhin verglichen Troost und Hautefeuille den Verlauf des Dampfdrucks bei Präparaten von rotem Phosphor, die bei verschiedenen Temperaturen hergestellt waren. Sie fanden folgendes: die bei niedriger Temperatur hergestellten Präparate (Handelsphosphor meist unter 250⁰) zeigen nach raschem Anstieg des Drucks einen allmählichen Abfall zu einem Endwert; derselbe Endwert wird auch von den bei hoher Temperatur hergestellten Präparaten in langsamem Anstieg erreicht. Dieses Verhalten wird durch die Theorie wie folgt erklärt: Bei hoher Temperatur ist in der festen Lösung wenig weißer Phosphor vorhanden und dieser genügt nicht, um den Raum mit gesättigtem Dampf zu füllen, die Umwandlungsgeschwindigkeit aber ist sehr gering (pro g und Stunde entstehen bei 440⁰ aus rotem Phosphor 0,3 g weißer); bei niederer Temperatur dagegen ist viel weißer Phosphor vorhanden, der bei der Erhitzung auf 450 bis 550⁰ rasch verdampft und einen fast reinen Hittorfschen Phosphor (spez. Gew. 2,34) zurückläßt: es entsteht ein von der Größe des Raumes (Ladedichte) abhängiger Druck, der größer als der Enddruck sein kann und dann nur langsam entsprechend der Einstellung des Gleichgewichts zurückgeht.

Ebenso finden aus dieser Anschauung heraus die Versuche von Lemoine ihre Erklärung: Lemoine erhitzte weißen und roten Phosphor in luftleeren Glasballons mit Variation der Dauer und der „Ladedichte“. Die Kurven streben fallend und steigend einem Endwert zu, doch wird dieser von der Kurve des roten Phosphors anfänglich in raschem Anstieg überschritten. Diese Verhältnisse, die Abhängigkeit von der „Ladedichte“ werden durch die Tabellen illustriert (zu ihrem Verständnis sei bemerkt, daß die Zahlen die Phosphormengen im Dampfraum bedeuten; der Dampf kondensiert sich zu weißem Phosphor; dem Gleichgewichtsdruck entsprechen 3,6 g im Liter):

(Tabellen siehe unten und nächste Seite oben.)

Der entscheidende Punkt bei den Versuchen mit rotem Phosphor ist, ob die vorhandene Menge des weißen Phosphors ausreicht, um den Raum unter den bestehenden Verhältnissen mit gesättigtem Dampf zu füllen. Bei geringerer Ladedichte findet allmählicher Anstieg statt entsprechend der Neubildung von weißem Phosphor, bei größerer Ueberschreitung des Enddrucks, bis der

Benutzter weißer Phosphor in g pro Liter	Menge des weißen Phosphors in Gramm, die beim Erhitzen auf 447⁰ zurückbleibt, nach: 5 Min.	³/₄ Std.	2 Std.	8 Std.	17 Std.	24 Std.	32 Std.	41 Std.
2,9	—	—	—	2,9	—	—	—	
5,9	—	—	—	5,3	—	—	4,0	[illegible]
16,0	—	—	—	5,0	—	—	—	
24,0 (Hittorf)	15,5	11,1	7,0	4,4	—	—	—	
30,0	—		5,4	4,0	3,7	3,6		[illegible]

Benutzter roter Phosphor in g pro Liter	Menge des weißen Phosphors, der beim Erhitzen auf 447° sich gebildet hatte, nach:							
	½ Std.	2 Std.	8 Std.	28 Std.	32 Std.	39 Std.	47 Std.	83 Std.
1,8	—	0,80	1,33	—		1,7	—	—
4,9	—	1,62	2,9	—		3,3	—	3,32
16,0		3,07	4,6		4,0		—	—
30,0	4,54	4,75	4,4	3,9	3,74		3,72	
100,0		—	4,2	—		—	—	—
1000,0		—	3,5(?)		—	—	—	—

Ueberschuß an Phosphordampf in die rote Modifikation umgewandelt ist.

Das Sintern des Phosphors. Schließlich können mit der Theorie noch die Erscheinungen beim Schmelzen des roten Phosphors erklärt werden. Roter Phosphor schmilzt nicht glatt, sondern sintert zunächst. Dieses Sintern tritt bei größerer Ladedichte sofort, bei geringerer erst nach einiger Zeit ein. Im zweiten Fall dampft der vorhandene weiße Phosphor rasch weg, ebenso der neu sich bildende gleich beim Entstehen, bis Sättigung eingetreten ist. Dann erst kann sich die sinternde feste Lösung bilden.

Kalorische Erscheinungen. Ebenso vermag die Theorie die Abnahme der Verbrennungswärme zu erklären, die beim Erhitzen eintritt: sie ist in der Abnahme des Gehaltes an weißem Phosphor begründet:

Material	Temperatur	Dauer des Erhitzens Std.	Verbrennungswärme Cal.	spez. Gewicht
Gereinigtes Handelsprodukt			a + 568	
,,	265°	650	a + 320	2,148
,,	300°	540	a + 298	2,19
,,	500°		> a	2,293
Hittorfscher Phosphor			a	2,34

Schwierigkeiten bei der Theorie von Cohen und Olie. 1. Kein Gleichgewicht. Wie erwähnt, waren die beobachteten Dichteänderungen nicht umkehrbar. Man hat also keine Gleichgewichte.

2. Unwahrscheinliche Höhe des Gehalts an weißem Phosphor. Aus den Dichten

(weiß = 1,83, rot = 2,17, Hittorfscher = 2,32)

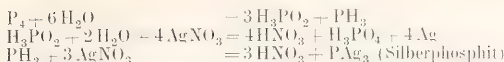
ergibt sich, wie Stock bemerkt, für den roten Handelsphosphor ein Gehalt an weißem Phosphor von $^3/_{10}$ (der Schencksche Phosphor kommt hier nicht in Betracht). Es ist sehr unwahrscheinlich, daß sich ein so hoher Gehalt an weißem Phosphor nicht physiologisch oder chemisch bemerkbar machen sollte.

Zusammenfassung. Aus dem Gesagten geht hervor, daß wohl beim Phosphor ähnliche Verhältnisse vorliegen wie beim Schwefel (s. dort); der weiße Phosphor würde dem löslichen, der rote dem unlöslichen Schwefel entsprechen. Doch fehlen wegen der zweifelhaften Umkehrbarkeit der Dichteänderungen die Daten zur Konstruktion eines Diagramms.

$\gamma\gamma$) Die Theorie von Smits. Sämtliche Modifikationen (auch weißer Phosphor) bestehen aus α- und β-Phosphor. Die Gleichgewichtskurve trifft auf die Entmischungslinie, wodurch ein rascher Umschlag in der prozentischen Zusammensetzung veranlaßt wird: Uebergang des weißen Phosphors in den roten.

7. **Analytisches.** In freiem Zustand und größerer Menge wird Phosphor leicht an den bekannten Eigenschaften (Leuchten, Phosphorgeruch) erkannt. Zum Nachweis kleinerer nicht unmittelbar erkennbarer Mengen dient die Mitscherlichsche Probe, die für die gerichtliche Medizin (Phosphorvergiftungen) von Bedeutung ist: sie beruht auf der Flüchtigkeit des Phosphors mit Wasserdampf und wird in der Weise ausgeführt, daß man das zu untersuchende Objekt (Speisereste, Leichenteile) mit Wasser zu einem Brei anrührt, mit Weinsäure schwach sauer macht und dann destilliert: im Kühler erscheint dort, wo der Phosphordampf mit der Luft in Berührung kommt, das Phosphorleuchten, das Destillat riecht nach Phosphor und reduziert ammoniakalische Silberlösung. Auch P_4S_3 leuchtet; das Leuchten wird verhindert durch Spuren von NH_3, H_2S, Alkoholdämpfe und andere Stoffe (s. auch oben S. 545); oft tritt das Leuchten erst nach einiger Zeit auf.

Eine sehr empfindliche Reaktion ist die folgende (Scheuersche Reaktion): Phosphordämpfe (auch PH_3) wirken auf $AgNO_3$ unter Schwärzung nach den Gleichungen:



$$P_4 + 6\,H_2O = 3\,H_3PO_2 + PH_3$$
$$H_3PO_2 + 2\,H_2O + 4\,AgNO_3 = 4\,HNO_3 + H_3PO_4 + 4\,Ag$$
$$PH_3 + 3\,AgNO_3 = 3\,HNO_3 + PAg_3 \text{ (Silberphosphit)}$$

Die Reaktion ist nur bei Abwesenheit von H_2S, AsH_3, SbH_3, HCHO, HCOOH beweisend, da diese ebenfalls schwärzen.

Diese Methode ist außer auf freien Phosphor auch auf alle Phosphorverbindungen anwendbar, die sich zu PH_3 reduzieren lassen (phosphorige, unterphosphorige Säure, nicht Phosphorsäure); ebenso die folgende Methode (von Blondlot-Dusart): Diese beruht darauf, daß PH_3-haltiger Wasserstoff mit einer Flamme brennt, die einen smaragdgrünen Kern zeigt; organische Substanzen hindern die Erscheinung; daher leitet man zuerst das mit Zn und H_2SO_4 entwickelte Gas in $AgNO_3$ und bringt das Phosphorsilber dann in den Blondlotschen Apparat.

Auch die letzte Methode zeigt außer Phosphor auch Phosphorsulfür an. Es ist aber wichtig, neben dem Sulfür auch den giftigen freien Phosphor nachweisen zu können. Dies ist möglich nach der Methode von Schenck und Scharff, indem durch Luft, die bei 30° über das fragliche Präparat geleitet wurde, nur bei Anwesenheit von freiem Phosphor oder von Phosphortrioxyd die erwähnte Entladung eines geladenen Elektroskops eintritt, nicht wenn P_4S_3 vorliegt.

Viele wasserfreie Phosphate werden durch Erhitzen mit Mg zu Phosphiden reduziert; diese entwickeln mit Wasser schon beim Anhauchen PH_3, der an seinem Geruch erkannt wird.

Freier Phosphor und alle Phosphorverbindungen werden durch Oxydation mit HNO_3 in Phosphorsäure oder Phosphate übergeführt, die dann mit Molybdänlösung oder Magnesiamixtur nachgewiesen werden (Nachweis des Phosphors im Eisen und Stahl).

Quantitative Bestimmung. Zur quantitativen Bestimmung wird der Phosphor in Phosphorsäure übergeführt, wenn er nicht schon in dieser Form vorliegt; diese wird dann meist mit Molybdänlösung oder Magnesiamischung abgeschieden und als $Mg_2P_2O_7$ gewogen. Auch eine maßanalytische Bestimmung ist möglich: mit Uranlösung entsteht ein Niederschlag von Uranylammoniumphosphat $UO_2NH_4PO_4$, als Indikator dient Ferrocyankalium (Tüpfelanalyse). Vgl. den Artikel „Chemische Analyse".

8. Spezielle Chemie. 8a) Allgemeines über den Phosphor im gebundenen Zustand. α) Atomvolum. Das Atomvolum des gebundenen Phosphors ist in den verschiedenen Verbindungen ziemlich konstant und unabhängig von der Valenzstufe, es ist größer als das des freien Phosphors (17,0):

PCl_3	PBr_3	$POCl_3$	$PSCl_3$	$POBrCl_2$	$PCl(C_2H_5)_4$
25,2	24,0	25,5	25,4	26,1	25,9

β) Atomrefraktion. Die Atomrefraktion zeigt konstitutive Einflüsse, sie ist teils größer, teils geringer als die des freien Phosphors; die Tabelle gibt Werte der D-Linie:

	n-Formel	n^2-Formel
Phosphor (fest)	18,68	—
„ (flüssig)	18,89	·
PH_3 (flüssig)	13,75	7,81
„ (gasförmig)	13,75	8,63
$P(C_2H_5)_3$	17,24	9,47
$P(C_2H_5)_4J$	18,24	10,29
PCl_3	14,89	8,32
PCl_5	16,65	8,81
$POCl_3$ (O doppelt gebunden)	8,92	4,97
$POCl_3$ (O einfach gebunden)	9,60	5,73
P_4O_6	9,71	5,33
P_2J_4	24,12	6,72
H_3PO_4	4,00(!)	2,00(!)

8b) Verbindungen mit Wasserstoff. α) Allgemeines. Man kennt vier Verbindungen des Phosphors mit Wasserstoff: PH_3, P_2H_4, $P_{12}H_6$, P_9H_2, den gasförmigen, den flüssigen und zwei feste Phosphorwasserstoffe. Direkte Vereinigung der Elemente findet nicht statt, man erhält die Verbindungen auf Umwegen. Die auffallendste Erscheinung bei der Darstellung des gasförmigen Phosphorwasserstoffs ist die Selbstentzündlichkeit des Gases an der Luft; sie beruht auf der Beimengung von flüssigem Phosphorwasserstoff. Zuweilen entsteht gleichzeitig auch fester Phosphorwasserstoff.

Von Interesse ist die Abwandlung der Reaktion bei den Phosphorwasserstoffen. Während PH_3 eine allerdings sehr schwache Base ist, die analog dem Ammoniak Salze bildet, bildet P_9H_2 Salze, in denen es als Säure erscheint (negativierender Einfluß der Metalloidatome).

β) Phosphorwasserstoff. Phosphin. PH_3. — Darstellung. PH_3 ist das Hauptprodukt bei der Einwirkung von Wasser auf die Phosphide der Alkali- und Erdalkalimetalle. Eine andere Entstehungsweise ist die Reaktion mit Laugen beim Kochen: $4P + 3NaOH + 3H_2O = PH_3 + 3NaH_2PO_2$.

Der Vorgang entspricht der Einwirkung der Halogene auf Laugen; als Zwischenprodukt muß man Phosphid annehmen, das aber sofort hydrolysiert wird. Neben PH_3 entsteht das Natriumhypophosphat.

Auch durch Reduktion von phosphoriger und unterphosphoriger Säure mit naszierendem Wasserstoff wird PH_3 erhalten. Interessant ist die Selbstreduktion dieser Säuren beim Erhitzen, sie zerfallen in PH_3 und Phosphorsäure.

Dem PH_3 beigemischter P_2H_4 wird durch konzentrierte HCl in PH_3 und festen Phosphorwasserstoff gespalten; reines Phosphin liefert die Umsetzung: $PH_4J + KOH = PH_3 + KJ + H_2O$.

Eigenschaften. Farbloses Gas von widerwärtigem Geruch (nach faulen Fischen). d = 1,17595: hieraus das Molekulargewicht 33,6 (PH_3 = 34,03).

Die Löslichkeit in Wasser ist gering: 5 Volume Wasser, 1 Volum Gas. Auch andere Lösungsmittel (Alkohol, Aether, fette Oele) lösen wenig. Dagegen wird PH_3 stark absorbiert von frisch geglühter Holzkohle: 1 Teil Kohle, 10 Teile Gas.

Unter Atmosphärendruck verdichtet sich Phosphin bei —86,2° zu einer farblosen Flüssigkeit; d = 0,744. Die molekulare Oberflächenenergie ergibt den Assoziationsfaktor 1,4. Die Flüssigkeit besitzt kein elektrolytisches Dissoziationsvermögen. Bei —133° geht die Flüssigkeit in den festen Zustand über.

Thermische Dissoziation. Bei höherer Temperatur (elektrischer Funke, glühender Draht) zerfällt PH_3 in (roten) Phosphor und Wasserstoff: das Volum steigt auf das 1½fache (Analyse). Das Studium dieses Vorgangs durch van't Hoff gehört zu den klassischen Arbeiten über die chemische Reaktionskinetik.

Die Zerfallsgeschwindigkeit steigt mit der Temperatur; ein günstiges Gebiet sind die Temperaturen von 300 bis 500°. Die Formel: $4PH_3 = P_4 + 6H_2O$ läßt eine tetramolekulare Reaktion erwarten, das Experiment ergab für monomolekularen Verlauf befriedigende Werte. Die Anwendung des Reaktionsordnung-Schemas ist aber hier wie in anderen Fällen, wo Ausscheidung eines festen Körpers stattfindet, nicht zulässig: man hat dann Reaktionen im heterogenen System, bei denen Diffusion und Absorption eine entscheidende Rolle spielen; man vergleiche die ähnlichen Verhältnisse bei der Zersetzung des Arsen- und Antimonwasserstoffs (S. 598 ff.).

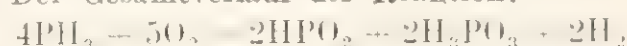
Der Einfluß der Temperatur geht aus der Tabelle hervor:

Temperatur	k (beobachtet)	k (berechnet)
310°	0,00048	(0,00048)
367³	0,0015	0,0014
440°	0,0057	0,0057
512°	0,0186	0,0186

Chemisches Verhalten. — Gegen Sauerstoff. PH_3 verbrennt unter Bildung von weißen Nebeln (P_2O_5); die Entzündungstemperatur liegt für reines von P_2H_4 freies Phosphin bei ca. 150°, dagegen machen schon 0,2 Volum-% P_2H_4 das Gas selbstentzündlich. Einen ähnlichen Erfolg haben kleine Mengen Stickstofftrioxyd, während Wasser „negativ katalytisch" wirkt. Hieraus erklärt sich die Erscheinung, daß Gemische von PH_3 und Luft oft plötzlich explodieren: durch die langsame Oxydation des PH_3 bilden sich hygroskopische Produkte (P_2O_3), die das Gas austrocknen und es explosibel machen. — Bei ungenügender Verbrennung (Sauerstoffmangel, rasche Abkühlung) scheidet sich roter Phosphor ab.

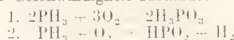
Von besonderem Interesse ist die langsame Oxydation des PH_3, für welche ähnlich wie beim elementaren Phosphor (s. S. 546) eine Grenze des Sauerstoffdrucks besteht, bei welcher die langsame Oxydation in die beschleunigte (Explosion) übergeht. Die Erscheinung wurde schon 1817 von Labillardière beobachtet und später von van't Hoff genauer studiert. — Bei Atmosphärendruck reagiert ein Gemisch von PH_3 und Luft nur langsam, bei Druckverminderung tritt in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchtigkeit Explosion ein: in trockenen Gemischen bei einem Sauerstoffpartialdruck von 76 mm bei 10°, von 180 mm bei 50°. Von der relativen Menge des PH_3 ist der Druck wenig abhängig. Bei feuchten Gemischen besteht eine untere Grenze wegen der hemmenden Wirkung der Feuchtigkeit.

Der Gesamtverlauf der Reaktion:



$$4PH_3 + 5O_2 = 2HPO_2 + 2H_3PO_3 + 2H_2$$

kommt durch zwei isolierbare Teilreaktionen gleicher Geschwindigkeit zustande:



$$1.\ 2PH_3 + 3O_2 = 2H_3PO_3$$
$$2.\ PH_3 + O_2 = HPO_2 + H_2$$

Phosphorige Säure nach Gleichung 1) entsteht aus den im Formelverhältnis gemischten trockenen Gasen bei geeigneter Verdünnung.

Metaphosphorige Säure nach Gleichung 2) erhält man, wenn gleiche Volumina beider Gase bei einem Druck von 25 mm langsam ineinander diffundieren läßt (intermittierendes Leuchten).

Gegen die Halogene und andere Elemente. In Chlorgas entzündet sich PH_3 und verbrennt mit glänzendem Licht zu PCl_3 und HCl. Auch Chlorwasser und unterchlorige Säure oxydieren. Brom gibt Phosphor und Bromwasserstoff, Jod Phosphordijodid und Wasserstoff (bei höherer Temperatur auch Jodphosphonium), Schwefel H_2S und Schwefelphosphor.

Interessant ist die Reaktion mit Metallsalzlösungen: es entstehen die freien Metalle, Metallphosphide und Anlagerungsverbindungen: eine Lösung von CuCl.HCl oder CuCl.KCl absorbiert reichliche Mengen PH_3: es bildet sich die Verbindung CuCl (PH_3), ein Analogon der Halogensilber-Ammoniakverbindungen.

Physiologische Verhalten. Phosphin ist ein starkes Gift, seine Wirkung scheint ähnlich zu sein wie die des elementaren Phosphors. PH_3 ist auch ein Katalysatorgift für Platin: es verhindert die Zersetzung des H_2O_2 durch kolloidales Pt in minimalen Konzentrationen und hemmt die Katalyse der Knallgasreaktion durch Platinschwamm.

Phosphoniumverbindungen. PH_3 vereinigt sich mit den Halogenwasserstoffsäuren zu salzartigen Verbindungen, die den Ammoniumhalogeniden (Salmiak) entsprechen, aber sehr viel weniger stabil sind: die Dämpfe sind stark dissoziiert, die Lösungen sind hydrolytisch gespalten. In den Lösungen muß man das Ion $PH_4^{\cdot}$ annehmen, das aber größtenteils nach $PH_4^{\cdot} \rightleftarrows PH_3 + H^{\cdot}$ zerfällt; hohe $H^{\cdot}$-Ionnenkonzentration wirkt nach dem Massenwirkungsgesetz dem Zerfall entgegen,

aus neutralen oder schwachsauren Lösungen aber entweicht gasförmiges PH_3. In stark sauren Lösungen kann sogar das Löslichkeitsprodukt $C_{NH_4'} \times C_{Hal.'}$ überschritten werden, worauf sich die feste Phosphoniumverbindung abscheidet; das Löslichkeitsprodukt nimmt vom Chlorid zum Jodid ab.

Das beständigste von den Phosphoniumhalogeniden ist das Jodphosphonium, HCl vereinigt sich nur unter hohen Drucken mit PH_3. Den großen Unterschieden in der freien Energie stehen nur geringe in den Bildungswärmen gegenüber:



$$PH_3 + HBr = PH_4Br + 23 \text{ Cal.}$$



$$PH_3 + HJ = PH_4J + 24{,}2 \text{ Cal.}$$

Alle 3 Verbindungen können nur unter höherem Druck geschmolzen werden.

	Chlorid	Bromid	Jodid
Sublimationspunkt:	—30 bis —35°	+30°	+80°

Jodphosphonium, PH_4J. Bildet sich aus den gasförmigen Komponenten PH_3 und HJ; am besten erhält man es aus Jodphosphor und Wasser. — Große, wasserhelle, zerfließliche Kristalle, die PH_3 entwickeln.

Bromphosphonium, PH_4Br. Wird durch direkte Vereinigung der gasförmigen Komponenten PH_3 und HBr erhalten; auch durch Einleiten von PH_3 in konzentrierte HBr. — Reguläre, zerfließliche, zersetzliche Kristalle. Die Dampfdichte 1,906 ergibt nahezu völligen Zerfall in die Komponenten (1,986 für PH_3 + HBr). Der Sublimationsdruck ist also ein Reaktionsdruck entsprechend dem Gleichgewicht $PH_4Br \rightleftharpoons PH_3 + HBr$.

Temperatur	7,6°	10,0°	13,6°	19,8°
Druck . .	118,6	148,6	180,9	266,8 mm

Chlorphosphonium, PH_4Cl. — Entsteht aus den gasförmigen Komponenten PH_3 und HCl unter Druck; bei Zimmertemperatur sind hierzu 20 bis 30 Atm. nötig, bei Abkühlung auf —32° erfolgt die Vereinigung schon bei gewöhnlichem Druck. Bei —41° existiert PH_4Cl in zwei Modifikationen: als glänzende Kristalle und als eine weiße Masse; unterhalb 41° gehen die Kristalle in die weiße Masse über, sie können aber unterkühlt werden und zeigen dann einen höheren Dampfdruck:

	—80	—70	—60	—50	—45	—40	—30	—25	—20	—15
Kristalle	9,5	20,2	62,0	140,4	196,0	284	603	943	1260	1924 m/m
weiße Masse	7,8	18,0	50,4	122,4	186,4					

Dampfdruck der Kristalle				Dampfdruck der Schmelze			
0°	10°	20°	28,5°	28,5°	30°	40°	49,5°
8,7	13,6	25,2	47,3	47,3	48,8	58,5	72,4 kg/cm²

Der Dampf ist vollkommen dissoziiert, die Kompressibilität setzt sich additiv aus der der Komponenten zusammen.

Die Druckempfindlichkeit des Schmelzpunkts ist eine ganz ungewöhnliche, was sich aus der ebenso ungewöhnlichen Volumänderung beim Schmelzen erklärt: diese beträgt (Δv) bei 28,5° für 1 g 0,87 cm³ — das 5-fache des nächstgrößten bekannten Wertes, beim Naphthalin.

28,5°	44,2°	50	57,9°	81°	102,4°
47,3	550	krit. Punkt	1050	2050	3050 kg/cm³

Der kritische Punkt liegt demnach nur 25° über dem Schmelzpunkt. Aus Δv und dem Druckkoeffizienten berechnet sich thermodynamisch eine Schmelzwärme von 180 cal. pro Gramm, die größte bekannte (Wasser = 80 cal.). In den Schmelzen oberhalb des kritischen Punktes liegt ein eigenartiger Fall vor: „Es ist hier zum erstenmal gelungen, die Kristalle eines Stoffes im Gleichgewicht mit ihrer hyperkritischen Schmelze, die man ebensowohl als Flüssigkeit wie als Dampf betrachten kann, zu studieren" (Tammann). — Das Verhalten des PH_4Cl findet seine Erklärung in Aenderungen des Molekularzustandes.

Phosphoniumhydroxyd, PH_4OH. Weißer kristalliner Körper; bei +2,2° beträgt der PH_3-Druck 2,7 Atm.

Phosphoniumsulfat, $(PH_4)_2SO_4$. Wird durch Auflösen von PH_3 in kalter H_2SO_4 (—20 bis —25°) erhalten; bei gewöhnlicher Temperatur wird H_2SO_4 durch PH_3 reduziert. — Weiße, zerfließliche, zersetzliche Kristalle.

Alkylphosphine. Durch Substitution des Wasserstoffs im PH_3 entstehen die interessanten Alkylphosphine. Man kennt 3 Reihen: primäre, sekundäre, tertiäre. Durch Anlagerung von Halogenalkyl an die tertiären Phosphine entstehen schließlich die Tetraalkylphosphoniumhalogenide und aus diesen die Hydroxyde. Darstellungsweisen und Eigenschaften findet man im Artikel „Organische Verbindungen der Metalle"; hier folgen nur einige physikalisch-chemische Angaben.

Die Alkylphosphine sind besonders bemerkenswert wegen der Aenderung der basischen Eigenschaften, welche durch die Alkylgruppen hervorgerufen wird; während bei den Phosphoniumsalzen der Salzcharakter nur ganz schwach ausgeprägt ist, verstärkt sich dieser mit steigender Zahl der eingetretenen Alkylgruppen — die Jodide der primären Phosphine erinnern noch an PH_4J, die der sekundären und tertiären dagegen an die Ammoniumsalze: die Hydrolyse ist bedeutend zurückgedrängt, nur durch Alkalihydroxyd werden die Basen freigemacht.

Ganz auffallend ist die Einwirkung bei den

Tetraalkylphosphoniumsalzen. Diese zeigen eine elektrolytische Dissoziation wie starke Salze:

	λ_{32}	λ_{64}	λ_{128}	λ_{256}	λ_{512}	λ_{1024}
$P(CH_3)_4Cl$	101,6	105,7	109,2	111,8	113,4	114,9
$P(C_2H_5)_4Cl$	92,2	96,2	99,7	102,1	104,0	105,2

Durch Silberoxyd können die freien Alkylphosphoniumhydroxyde erhalten werden. Diese sind sehr starke Basen, die wie die Alkalien und die Tetraalkylammoniumverbindungen nahezu völlig dissoziiert sind. Für Tetramethylphosphoniumhydroxyd $P(CH_3)_4.OH$ — zerfällt im Gegensatz zu den Alkylammoniumhydroxyden beim Erhitzen in $P(CH_3)_3O$ und CH_4 — sind die Werte:

v =	16	64	256 l/mol.
λ =	214	221	223

Die Oxydation führt bei den primären Phosphinen zu den Alkylphosphosäuren, $PRO(OH)_2$, bei den sekundären zu den Alkylphosphinsäuren, PR_2OOH, bei den tertiären zu Phosphinoxyden, PR_3O (bei dieser viel studierten Autoxydation wird aber mehr Sauerstoff aufgenommen als dem Oxyd entspricht, nahezu doppelt so viel; es scheint ein Superoxyd zu entstehen. Außer Sauerstoff lagern die tertiären Phosphine auch Schwefel und Chlor an ($R_3P.S$; $R_3P.Cl_2$); weiterhin sind eigentliche Additionsverbindungen bekannt, so mit CS_2.

β) Flüssiger Phosphorwasserstoff, P_2H_4. Der flüssige P_2H_4 entsteht bei der Einwirkung von Wasser auf Calciumphosphid als Nebenprodukt bei der Darstellung des PH_3, dessen Selbstentzündlichkeit (bei 0,2 Gew.-%) er bedingt. Durch Kältemischungen kann er aus dem Gasgemisch kondensiert werden. Er wurde 1845 von Thénard entdeckt.

P_2H_4 ist eine farblose, stark lichtbrechende Flüssigkeit; $d_{12} = 1{,}007$ (negativer Temperaturkoeffizient); bei —20° noch nicht fest, $Kp_{(735)}$ 57—58° (bei rascher Erwärmung Zersetzung). Die Dampfdichte entspricht der Formel P_2H_4 (also analog N_2H_4). — Unlöslich in Wasser, löslich in Alkohol und Terpentinöl (Zersetzung). Beim Aufbewahren zerfällt P_2H_4 allmählich nach der (nur quantitativen!) Formel: $5P_2H_4 = 6PH_3 + P_2H$ in gasförmigen und festen Phosphorwasserstoff. Rasch tritt diese Zersetzung ein bei Belichtung, beim Einleiten in konz. HCl und bei Berührung mit porösen Körpern (Kohle, Bimstein, Watte, Calciumchlorid; s. u.).

γ) Feste Phosphorwasserstoffe, $P_{12}H_6$ und P_9H_2. — Gelber Phosphorwasserstoff $P_{12}H_6$. Entsteht vor allem aus flüssigem P_2H_4 nach der eben angegebenen Reaktion; außerdem entsteht er noch bei einer Reihe von anderen Reaktionen, oft gemischt mit rotem Phosphor (ein solches Gemisch ist z. B. das „Phosphorsuboxyd" P_4O). Am besten erhält man ihn nach Stock durch Zersetzung des bei der PH_3-Darstellung aus Calciumphosphid und Wasser gebildeten P_2H_4 durch $CaCl_2$, das durch Lösen leicht zu entfernen ist.

Man erhält so den $P_{12}H_6$ als ein lockeres rein gelbes Pulver ($d_{19} = 1{,}83$), das immer etwas zu wenig H enthält (PH_3-Verlust bei der Darstellung). Frisch dargestellt ist er geruchlos und reagiert neutral, beim Stehen aber nimmt er saure Reaktion an und riecht nach PH_3. Im Licht zersetzt er sich rasch, färbt sich rot und entwickelt große Mengen Gas. Beim langsamen Erhitzen findet Zersetzung in P und H_2 statt (Zwischenprodukt P_9H_2; s. u.); gegen 200° entzündet er sich.

$P_{12}H_6$ ist in geschmolzenem Phosphor und in flüssigem P_2H_4 löslich; außerdem gibt es kein Lösungsmittel, auch verflüssigtes PH_3 löst nicht. Die Gefrierpunktserniedrigung in der Phosphorschmelze ergibt die Formel $P_{12}H_6$. Physiologische Wirkungen übt $P_{12}H_6$ nur durch das abgespaltene Phosphin aus.

Orangeroter Phosphorwasserstoff, P_9H_2. — Erhitzt man $P_{12}H_6$ mit allmählicher Temperatursteigerung, so beginnt bei 60° eine Gasentwicklung, die bei 200° fast ganz aufhört und erst bei 260° wieder einsetzt. Die erste Reaktionsstufe entspricht der Bildung des P_9H_2, bei weiterer Temperatursteigerung findet völlige Zersetzung unter Hinterlassung von rotem Phosphor statt (Stock).

P_9H_2 ist intensiv orange gefärbt; $d_{16} = 1{,}95$. Ein indifferentes Lösungsmittel existiert nicht, geschmolzener Phosphor nimmt ihn im Gegensatz zu $P_{12}H_6$ nicht wesentlich auf.

Salze der festen Phosphorwasserstoffe. Gelber und orangeroter Phosphorwasserstoff färben sich mit NH_3 schwarz und lösen sich in flüssigem NH_3 mit roter Farbe, beim Eindampfen hinterbleibt eine schwarze Substanz, die durch Säuren oder durch Erhitzen unter Abgabe von NH_3 in einen orangeroten Körper übergeht. Der Unterschied der beiden Stoffe liegt darin, daß mit gelbem $P_{12}H_6$ Phosphin entwickelt wird, während sich P_9H_2 ohne Gasentwicklung auflöst. Es wird also in beiden Fällen ein Salz des P_9H_2 gebildet.

Durch die Häufung der Metalloidatome hat P_9H_2 den Charakter einer schwachen Säure erhalten. Die Zusammensetzung der Ammoniaksalze liegt zwischen $P_9H_2.NH_3$ und $(P_9H_2)_2.NH_3$. Beim Erhitzen entweicht zunächst (bis 200°) NH_3 und es bleibt in der Hauptsache P_9H_2 zurück, bei höherem Erhitzen findet völliger Zerfall statt mit Hinterlassung von P_3N_5.

Metallphosphide. Phosphorlegierungen. Durch Ersatz des Wasserstoffs in PH_3 durch Metall entstehen in formaler Analogie zu HCl und H_2S Salze vom Typhus $Me^{I}{}_3P$ oder $Me^{II}{}_3P_2$ usw. In Wirklichkeit aber ist der negative Charakter des Phosphors so schwach, daß er nur durch die positivsten Elemente, die

Alkalien und Erdalkalien in diese Rolle gedrängt wird, und die entstehenden Verbindungen sind so schwach, daß sie praktisch vollständig der Hydrolyse unterliegen: die Zersetzung des Phosphorcalciums ist ja eine Darstellungsmethode des PH_3. — Wie durch Häufung der P-Atome in den festen Phosphorwasserstoffen der saure Charakter der H-Atome gesteigert wird (Polyphosphide), wurde schon oben dargelegt. — Eine eigentümliche Stellung nehmen die Phosphide der Schwermetalle ein: Sie haben den Salzcharakter völlig verloren; für ihre Verbindungstypen ist nicht mehr die normale Valenz maßgebend ($Ni_2P . Ni_2P_3 . Fe_2P . Fe_3P_3 . Fe_3P_4 . Fe_2P_3$); sie haben metallisches Aussehen und metallische Eigenschaften (Leitfähigkeit), sie legieren sich mit Metallen (vgl. den Artikel „Legierungen“).

Besonders gut untersucht und von großer Bedeutung für die Technik sind die Legierungen mit Kupfer (Phosphorbronzen) und Eisen (vgl. den Artikel „Legierungen“).

Bei höheren Temperaturen dissoziieren die Phosphide, der Druck ist um so stärker je edler das Metall ist, bei den Alkalien und Erdalkalien ist er unmeßbar klein. Der Druck von Ag_2P und CuP_2 wurde von Granger gemessen:

Ag_2P t	Ag_2P p	CuP_2 t	CuP_2 p
350°	sehr klein	410°	sehr klein
390°	58,6 mm	445°	7,4 mm
450°	100,1 „	495°	16,6 „
520°	172,9 „	520°	93,3 „
610°	214,5 „	570°	99,8 „

Die Phosphormetalle sind meist (die der Schwermetalle) sehr widerstandsfähig gegen chemische Agenzien; so gegen Wasser, nur die Alkali- und Erdalkaliphosphide werden unter Bildung von PH_3 zersetzt; verdünnte Säuren greifen nur Mg- und Zn-Phosphid an, ebenfalls unter Bildung von PH_3; Salpetersäure führt in Phosphate über, doch werden manche selbst von heißem Königswasser nicht angegriffen; Chlor und Brom geben Metallchlorid und Phosphorchlorid, einige aber, z. B. Eisenphosphid, bleiben selbst bei höherer Temperatur unangreifbar; in Sauerstoff verbrennen viele Phosphide zu Phosphaten, die Edelmetalle ergeben Metall und Phosphorsäure, die Phosphide von Fe, Ni, Co sind selbst bei höheren Temperaturen beständig, wenn keine basischen Substanzen zugegen sind (Thomasprozeß); mit Schwefel entstehen teils Sulfide, teils kompliziertere Verbindungen.

Die Darstellung erfolgt meist nicht durch direkte Einwirkung der Elemente aufeinander (Zusammenschmelzen von Alkalimetall und Phosphor unter Petroleum; Absorption von P-Dämpfen durch Zink), da hierbei keine reinen Produkte entstehen, sondern auf Umwegen, z. B. durch Reduktion von Phosphaten mit Metall oder Kohle: Zinkphosphid aus $Mg_3(PO_4)_2$, ZnS und Kohle.

Auch auf nassem Wege erhält man Phosphide, aber ebenfalls selten rein; bei der Einwirkung von PH_3 auf Metallsalzlösungen entstehen schwer trennbare Gemische von Metall, Phosphid und Phosphor; Bessere Resultate erhält man bei der Umsetzung von Phosphorhalogeniden (besonders PCl_3) mit Metallen; nur die Edelmetalle machen eine Ausnahme (Hg reagiert aber mit Phosphorjodür).

In manchen Fällen (nicht bei Edelmetallen) führt die Reaktion von P mit Metallverbindungen zum Ziel: $SbBr_3$ ergibt mit Phosphor das Phosphid SbP, Phosphorcalcium wird dargestellt, indem man Kalk über Phosphor schichtet und erwärmt.

8c) Halogenverbindungen. α) Allgemeines. Phosphor verbindet sich mit den Halogenen direkt zu Tri- und Penta-Halogeniden, die Heftigkeit der Vereinigung nimmt vom Fluor zum Jod ab und ebenso die Beständigkeit der Pentaverbindungen (Gleichgewicht $PHal_5 \rightleftarrows PHal_3 + Hal_2$); PJ_5 existiert jedenfalls nur bei tiefen Temperaturen. Außerdem gibt es gemischte Verbindungen, Oxy- und Sulfohalogenide.

	Schmelzpunkt	Siedepunkt	Bildungswärme in Cal.
PF_3	−160°	−95°	ca. 108
PF_5	85°	75°	
PCl_3	<−115°	+76°	76
PCl_5	+148°	+140°	107
PBr_3	−41,5°	+175°	44,8
PBr_5	–		—
PJ_3	+60°	dissoz.	10,9
PJ_5	?	?	?
P_2J_4	+110	?	2 9,9

Eine der wichtigsten Reaktionen der Phosphorhalogenide ist die Zersetzung durch Wasser, die praktisch vollständig ist. Die Triebkraft der Reaktion ist aber bei den verschiedenen Halogeniden nicht dieselbe; durch eine Versuchsanordnung wie sie

Wenzel zur Bestimmung der Stärke der Säuren benutzte — Umsetzung an einer konstanten Berührungsfläche — wurden folgende relative Werte erhalten: für die Zersetzung von je $1/_{1000}$ Mol. PCl_3 und PBr_3 waren 17′43″ und 10′33″ nötig, für den Umsatz der gleichen Menge $PSCl_3$ dagegen 706′15″.

β) Fluoride. — Phosphortrifluorid PF_3. Das Trifluorid wird meist nicht aus den Elementen dargestellt, sondern auf dem Weg der doppelten Umsetzung: durch Erhitzen gleicher Teile Fluorblei und Kupferphosphür, oder durch Eintropfen von $AsFl_3$ in PCl_3, oder aus Silberfluorid und PCl_3. — Trifluorid ist ein farbloses Gas, das bei Atmosphärendruck bei —95° flüssig wird (bei —10° 40 Atmosphären, bei 24° > 180). Das flüssige PF_3 ist farblos und sehr beweglich. Plötzliche Druckverminderung bei —20° ergibt festes PF_3 vom Fp.—160°. Die Gasdichte wurde in guter Uebereinstimmung mit dem theoretischen Wert 3,045 zu 3,022 gefunden; auch beim Erhitzen findet keine Dissoziation statt; durch den elektrischen Funken erfolgt Umsetzung nach: $5PF_3 = 3PF_5 + P_2$.

Chemisches Verhalten. PFl_3 brennt nicht wie PCl_3, explodiert aber mit Sauerstoff gemischt beim Erhitzen ($POFl_3$); mit Wasserstoff entsteht PH_3 und HFl. — Mit Wasser erfolgt bei gewöhnlicher Temperatur nur sehr langsam Umsetzung; neben phosphoriger Säure scheint eine komplexe fluorphosphorige Säure zu entstehen. — Cl, Br, J werden addiert unter Bildung von gemischten Pentahalogeniden. — Silikate zerlegen das Gas (SiF_4); Natrium absorbiert vollständig; Kupfer bildet Kupferphosphid; Aluminium wird durch einen Ueberzug von $AlFl_3$ geschützt.

Phosphorpentafluorid PF_5. Das Pentafluorid entsteht aus PF_3 und freiem Fluor, oder beim Durchschlagen elektrischer Funken durch PF_3; umgekehrt zerfällt durch den elektrischen Funken PF_5 in PF_3 und F_2. Moissan stellte es meist aus PF_3Br_2 dar, das sich bei 15° nach der Gleichung: $5PF_3Br_2 = 3PF_5 + 2PBr_5$ zersetzt (PF_3Cl_2 erst bei 250°). — PF_5 ist ein farbloses Gas von stechendem Geruch. Die Dampfdichte ist normal (im Gegensatz zu den anderen Pentahalogeniden); sie wurde zu 4,49 gefunden (theoretisch 4,40). Bei 16° wird das Gas unter einem Drucke von 23 Atmosphären flüssig, bei Atmosphärendruck bei —75°. Wird der Druck plötzlich aufgehoben, so entsteht festes PF_5 vom Fp. —83°. PF_5 greift Glas nicht an (geringe Fluortension), es raucht an feuchter Luft (Oxyfluorid und HFl). Man kennt verschiedene Additionsverbindungen: $2PF_5 . N_2O_4$; $2PF_5 . P \cdot Cl_4$.

Durch Anlagerung der anderen Halogene an PF_3 entstehen die gemischten Halogenide, von denen PF_3Br_2 schon als Ausgangsmaterial für die PF_5-Darstellung erwähnt wurde.

γ) Chloride — Phosphortrichlorid PCl_3. In einer Chloratmosphäre entzündet sich Phosphor und verbrennt mit grüner Flamme zu PCl_3. Zur Darstellung leitet man Chlor über geschmolzenen Phosphor; die Reaktionswärme genügt, um das PCl_3 abzudestillieren; es bildet sich auch etwas PCl_5, das durch Rektifikation mit P aus dem Destillat entfernt wird. Auch leicht reduzierbare Chlorverbindungen chlorieren den Phosphor ($HgCl_2$, $FeCl_3$, JCl_3, Chlorschwefel). — PCl_3 ist eine farblose Flüssigkeit; $d_0 = 1,5971$, $d_{20} = 1,5774$. Spezifische Wärme zwischen 10 und 15°: 0,1987. Die molekulare Oberflächenenergie ergibt mit dem Molekulargewicht PCl_3 den normalen Temperaturkoeffizienten 2,097; die Molekeln sind also nicht assoziiert.

Der Brechungskoeffizient für die Linie H_γ bei 15,4° beträgt 1,54306; die Dielektrizitätskonstante ist 3,36, also ein sehr niedriger Wert (Wasser 80); die dissoziierende Kraft ist deshalb äußerst gering, Salze werden nicht ionisiert. — Festes PCl_3 ist nicht bekannt, bei —115° ist PCl_3 noch flüssig.

Der Siedepunkt unter Atmosphärendruck liegt bei 75,95°, bei 0° beträgt der Dampfdruck 33,98 mm, bei 20° 100,55 mm. Die kritische Temperatur liegt bei 285,5°, aus der Oberflächenspannung ergibt sich der Wert 290,5°. Die molekulare Verdampfungswärme beträgt 6,90 Cal. Die Dampfdichte auf Luft bezogen ist 4,875; hieraus ergibt sich die Molekulargröße PCl_3 (4,75). Der Brechungsexponent für Na-Licht bei 0° und 760 mm ist 1,001740. Die spez. Wärme bei konstantem Druck zwischen 111° und 246° ist 0,13473.

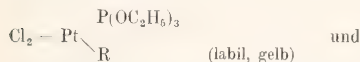
Phosphorchlorür ist unbeschränkt mischbar mit Benzol, Aether, CS_2, $CHCl_3$. Die Gefrierpunktserniedrigung einer Lösung von Trichlorid in Phosphoroxychlorid ergab normales Molekulargewicht. Phosphortrichlorid löst eine Reihe von Stoffen auf, u. a. größere Mengen von Phosphor.

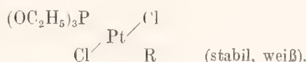
Hydrolyse. PCl_3 mischt sich nicht mit Wasser, wohl aber lösen sich die Produkte der Hydrolyse, PO_3H_3 und HCl. An feuchter Luft raucht PCl_3.

PCl_3 ist als Chlorierungsmittel in der organischen Chemie von Bedeutung (Säurechloride); es können dabei aber auch phosphorhaltige Substanzen entstehen; Metalle werden chloriert (Edelmetalle nicht), P wird frei oder bildet Metallphosphid; HJ gibt PJ_3 und HCl.

Additionen. Trichlorid hat große Neigung, in den fünfwertigen Zustand überzugehen: die Halogene werden ohne weiteres angelagert (mit Ausnahme von Jod); Sauerstoff wird bei gewöhnlicher Temperatur aus Ozon aufgenommen, außerdem bei der Verbrennung von PCl_3-Dampf ($POCl_3$);

Schwefel bildet bei 130° mit PCl_3 das Sulfochlorid ($PSCl_3$). Außer diesen von der gewöhnlichen Valenzlehre vorgesehenen Additionsprodukten existieren noch eine Reihe von Anlagerungsverbindungen: $PCl_3(NH_3)_5$: $PtCl_4.PCl_3$; $PtCl_2.PCl_3$; die Platindoppelverbindungen entstehen durch Einwirkung von PCl_5 auf Platinschwamm. Das Chlor des Phosphorchlorürs kann durch Hydroxyl und Oxalkyl ersetzt werden: $[PtCl_2.P(OC_2H_5)_3]_2$. Schließlich können noch Neutralteile (NH_3, $C_6H_5.NH_2$, C_5H_5N, CO u. a.) angelagert werden, wobei interessante Isomerieerscheinungen auftreten (vgl. den Artikel „Valenzlehre"):





Phosphorpentachlorid PCl_5. Phosphorpentachlorid wurde 1816 von Davy entdeckt. Man erhält es durch Ueberleiten von Chlorgas über PCl_3, das Chlor wird lebhaft absorbiert. Auch aus Phosphor direkt kann es natürlich gewonnen werden, besonders aus Lösungen desselben (in PCl_3, CS_2 u. a.); weiterhin aus PCl_3 und chlorreichen Verbindungen (z. B. Chlorschwefel).

PCl_5 ist eine weiße kristallinische Masse, die an der Luft raucht; die Dämpfe riechen eigenartig und reizen die Schleimhäute. Bei Atmosphärendruck sublimiert es, ohne vorher zu schmelzen; im geschlossenen Rohr schmilzt es bei 148°.

Die Dampfdichte ist viel geringer als die für PCl_5 berechnete; der Dampf ist stark in PCl_3 und freies Chlor dissoziiert, dessen grüne Farbe bei Steigerung der Temperatur immer mehr hervortritt.

Temperatur	Dampfdichte	% zersetzt
182°	5.08	41.7
250°	4.00	80.0
300°	3.65	97.3

Der Einfluß der Temperatur auf die Zersetzung ist in der exothermen Bildungswärme (29,7 Cal.) begründet — der Zerfall verbraucht Wärme. Zusatz von PCl_3 hat nach dem Massenwirkungsgesetz zur Folge, daß die Dissoziation zurückgeht: mit überschüssigem PCl_3 berechnet man Dichten für PCl_5, die dem normalen Wert 7,2 nahekommen.

Chemisches Verhalten. Das PCl_5 ist äußerst reaktionsfähig, es wirkt in vielen Fällen ähnlich wie freies Chlor: Metalle (Cd, Zn, Fe, auch die Edelmetalle) werden chloriert; in manchen Fällen (Zink bei höherer Temperatur) entstehen auch Phosphide. — Sehr wichtig ist die Umsetzung mit OH- und O-haltigen Stoffen, besonders in der organischen Chemie (Chlorierung von Säuren, Säureanhydriden, Ketonen, Aldehyden). Als OH-Substitution kann auch die Umsetzung mit H_2O (Hydrolyse) betrachtet werden, bei der Phosphorsäure oder $POCl_3$ entsteht: $PCl_5+4H_2O = H_3PO_4+5HCl$. Die Reaktion ist sehr heftig, es werden ca. 120 Cal. entwickelt. Wirkt das Wasser in geringer Menge (z. B. als Dampf) ein, so entsteht $POCl_3$. — Mit Ammoniak entstehen stickstoffhaltige Derivate der Phosphorsäure. — Anlagerungsverbindungen. Auch das Pentachlorid bildet eine Reihe von Anlagerungsverbindungen: $PCl_5.8NH_3$, $PCl_5.JCl$, $(PCl_5)_2.AsCl_3$, $(PCl_5)_2PtCl_4$.

δ) Bromide. — Phosphorbromür, PBr_3. Die Verbindung entsteht durch direkte Einwirkung der Elemente, doch arbeitet man immer unter Bedingungen, welche die Reaktion nicht zu heftig werden lassen (z. B. beide Komponenten in CS_2 gelöst). Bequem ist die Darstellung aus rotem Phosphor, auf den man unter Kühlung Brom tropfen läßt.

Das Tribromid ist eine wasserhelle bewegliche Flüssigkeit, welche an der Luft raucht; $d_4^0 = 2{,}9231$. Die Flüssigkeit siedet bei Atmosphärendruck bei 175,3° und soll bei —41,5° fest werden. Die kritische Temperatur liegt bei 411°. Der Brechungskoeffizient für Na-Licht ist 1,6945. — PBr_3 löst wie PCl_3 viele Stoffe, so Phosphor und Jod.

Chemisches Verhalten. Die Reaktionen des PBr_3 sind im wesentlichen denen des PCl_3 analog; eine Reihe anderer beruht auf der größeren Affinität des Chlors zu Phosphor (s. u.): Chlor verdrängt das Brom aus dem PBr_3, Metallchloride gehen in Bromide über, während sich PCl_3 bildet. Mit Sauerstoff gemischt verbrennt der Dampf bei ca. 200° zu P_2O_5, Brom wird frei.

Mit Wasser zerfällt PBr_3 in PO_3H_3 und HBr (Hydrolyse) bei gewöhnlicher Temperatur mit bequem meßbarer Geschwindigkeit; Wärmetönung 64,1 Cal.

Das Brom kann zum Teil durch Alkyl oder Aryl substituiert werden, z. B. $PBr_2C_6H_5$.

Wie beim PCl_3 sind Anlagerungsverbindungen bekannt: $PtBr_2.PBr_3$; $PtBr_2.(PBr_3)_2$ $PtBr_2.[P(OCH_3)_3]_2$

Phosphorpentabromid PBr_5. — PBr_5 entsteht durch Addition von Brom an PBr_3 und aus PCl_3 und Brom bei Zusatz von Jod.

Diese Bildung ist auffällig, da ja normalerweise Brom durch Chlor aus seinen P-Verbindungen verdrängt wird; der Umsatz im angegebenen Sinn wird nur durch das Jod ermöglicht und zwar in der folgenden Weise: der Umsatz $2PBr_3 + 3Cl_2 \rightleftarrows 2PCl_3 + 3Br_2$ stellt sich [illegible] ein Gleichgewicht ein:

$$(PBr_3)^2 = \text{const.}\ \frac{(PCl_3)^2.(Br_2)^3}{(Cl_2)^3}$$

Die Wirkung des Jods ist nun die, daß durch Bildung der Verbindung JCl freies Chlor gebunden wird, das zur Herstellung des Gleichgewichts aus PCl_3 unter Bildung von PBr_3 nachgeliefert werden muß. Auf diese Weise wird eine größere Konzentration des PBr_3 ermöglicht, aus dem dann mit freiem Brom PBr_5 sich bildet.

Phosphorpentabromid ist eine zitronengelbe, kristallinische, an der Luft rauchende Masse, die bei höheren Temperaturen flüssig wird. PBr_5 ist wohl dimorph: aus dem Dampf erhält man bei langsamem Abkühlen rote, bei raschem gelbe Kristalle. Bei gewöhnlicher Temperatur ist die rote Modifikation labil. PBr_5-Dampf ist noch stärker dissoziert als PCl_5-Dampf. Der Dissoziationsgrad ist nicht genauer bestimmt. Auch in Lösung (CS_2, CCl_4) findet Dissoziation statt, bei höheren Temperaturen nehmen die Lösungen die Farbe des Broms an.

Chemisches Verhalten. Mit wenig Wasser entsteht aus PBr_5 Oxybromid, mit mehr Phosphorsäure und Bromwasserstoffsäure. Mit H_2S entsteht Sulfobromid. — Chlor bildet Pentachlorid, Jod Tribromid und Bromjodid. — Metalle gehen in Bromid und Phosphid über. Auch Anlagerungsverbindungen werden gebildet $PBr_5 . 9NH_3$.

Phosphorchlorbromid PCl_3Br_2. Bei Einwirkung von Brom auf PCl_3, bilden sich zwei nicht mischbare Lösungen einerseits von Brom in Trichlorid, andererseits von Trichlorid in Brom. Aus dieser erhält man die Verbindung PCl_3Br_2 in Kristallen, die bei 35° schmelzen, wobei wieder Zerfall in zwei Schichten eintritt. Die Verbindung PCl_3Br_2 vermag noch mehr Brom aufzunehmen ($PCl_3Br_2 . Br_2$, $-2Br_2$, $-3Br_2$).

ε) Phosphorjodide. Phosphor verbindet sich mit Jod direkt zu den Verbindungen PJ_3 und P_2J_4. Die Existenz des Pentajodides ist nicht sicher gestellt.

Phosphordijodid P_2J_4. Man erhält die Verbindung am besten durch Eintragen von Jod in eine Lösung von Phosphor in CS_2. Außerdem wird es durch Reduktion von Trijodid mit Quecksilber und durch Einwirkung von Jod auf PH_3 erhalten. Eine merkwürdige Bildungsweise ist noch die Einwirkung von Jod auf PCl_3. Diese Reaktion ist eben so auffällig und ist in eben derselben Weise zu erklären, wie die Bildung von Pentabromid aus Trichlorid.

P_2J_4 bildet schöne orangerote Kristalle, die bei 110° zu einer roten Flüssigkeit schmelzen. Aus der Dampfdichte ergibt sich die Formel P_2J_4 (18—20, theoretisch 19,7). — Mit Wasser tritt Zersetzung ein; mit wenig Wasser entsteht Jodphosphor und ein gelber flockiger Körper (P oder Phosphorwasserstoff).

Phosphortrijodid PJ_3. Entsteht in derselben Weise wie das Dijodid aus Phosphor in CS_2-Lösung und Jod. Beim Abkühlen scheiden sich dunkelrote säulenförmige Kristalle aus, die bei 55° schmelzen. Die Dampfdichte beträgt 14,32—14,62 (theoretisch 14,29). Bei höheren Temperaturen findet Dissoziation in Dijodid und Jod statt.

8d) Oxyde des Phosphors. α) Allgemeines. Bei der Verbrennung des Phosphors entstehen zwei Oxyde, das Trioxyd P_4O_6 und das Pentoxyd P_2O_5. Durch Erhitzen des Trioxyds entsteht Tetroxyd P_2O_4; über „Suboxyd" P_4O s. S 558.

β) Phosphortrioxyd P_4O_6. Zur Darstellung leitet man einen trockenen Luftstrom über geschmolzenen Phosphor, der sich entzündet und zu Tri- und Pentoxyd verbrennt. Die Verbrennungsprodukte werden durch ein auf 60° gehaltenes Messingrohr geleitet, in dem sich ein Glaswollefilter befindet. Bei dieser Anordnung wird das Pentoxyd durch die Glaswolle zurückgehalten. Auch durch Hydrolyse von PCl_3 kann es gewonnen werden.

Das Trioxyd bildet gewöhnlich eine weiße kristallinische Masse, man kann aber auch schöne monokline Kristalle erhalten; $d_4^2 = 1,9431$. Bei 22,5° schmilzt es zu einer wasserhellen, leichtbeweglichen Flüssigkeit, deren Dichte von 24,8° bis 173,1° von 1,9358 bis 1,6897 abnimmt. Brechungsexponent für die H-Linie 1,5677. Die Flüssigkeit ist ein nahezu vollkommener Isolator, die Leitfähigkeit ist geringer als die des reinen Wassers. Die Dielektrizitätskonstante in der Nähe des Fp. ist 3,2. Elektrische Wellen werden nicht absorbiert.

Die Flüssigkeit ist ziemlich flüchtig. Der Dampfdruck beträgt beim Schmelzpunkt 2,7 mm, bei 91,2° 279,9, bei 173,1° wird der Atmosphärendruck erreicht (Siedepunkt). — Die Dampfdichte 7,7 entspricht der Formel P_4O_6. Dieselbe Molekulargröße besitzt das Trioxyd und in Benzollösung (Gefrierpunktserniedrigung) und im flüssigen Zustand (normaler Temperaturkoeffizient der molaren Oberflächenenergie).

Ueber 210° findet Zerfall statt nach der Gleichung: $2P_4O_6 = 2P + 3P_2O_4$. Auch Licht wirkt zersetzend. Es entsteht zunächst ein roter Körper, nach dessen Entfernung keine weitere Veränderung eintritt. Die Einwirkung findet nur bei Präparaten statt, die destilliert worden waren (?).

Eingehend studiert ist das Verhalten des Trioxyds gegen Sauerstoff. Das Trioxyd geht bei der Oxydation in Pentoxyd über, bei der langsamen Oxydation zeigen sich Erscheinungen, die an die langsame Oxydation des Phosphors erinnern (vgl. S. 546). — Bei 70° geht die langsame Verbrennung in die heftige über.

Mit Chlorgas findet energische Reaktion statt (PCl_5); durch Abschwächung der Einwirkung kann man die Zwischenprodukte PO_2Cl und $POCl_3$ erhalten. — Brom gibt analog PO_2Br und $POBr_3$. — Jod wirkt langsam und unvollständig ein unter Bildung einer orange-

gelben Substanz unbekannter Natur. Aus konzentrierten Lösungen erhält man P_2J_4. — Schwefel wird bei 160° addiert unter Bildung von $P_4O_6S_4$; ähnlich Selen. — Wasser wirkt in der Kälte unter Bildung von phosphoriger Säure. Heißes Wasser und konzentrierte Alkalilaugen reagieren sehr heftig, es entsteht Phosphor, Phosphorwasserstoff, Phosphorsäure. — Salzsäure führt in Trichlorid über.

Physiologische Wirkung: Aehnlich wie beim freien Phosphor; Glykogenausscheidung aus der Leber, Gewebeentartung.

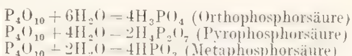
γ) Phosphortetroxyd P_2O_4. — Erhitzt man die Verbrennungsprodukte des Phosphors (Gemisch von P_2O_3 und P_2O_5) im Vakuum auf 290°, so entsteht ein weißes kristallinisches Sublimat von P_2O_4 nach der Gleichung: $2P_4O_6 = 3P_2O_4 + 2P$. Der dabei entstehende Phosphor ist Säure- und Phosphorwasserstoffhaltig („Phosphorsuboxyd" s. S. 558). Die Kristalle sind doppelbrechend, tetragonal (?), vielleicht isomorph mit Antimontetroxyd (Cervantit). — Im Vakuum geht das P_2O_4 bei ca. 180° in den Dampfzustand über; die Dampfdichte ist noch nicht bestimmt, die Molekulargröße deshalb noch unsicher. — Das P_2O_4 ist sehr hygroskopisch; in Wasser löst es sich nicht zu Unterphosphorsäure, für deren Anhydrid man es halten könnte, sondern zu phosphoriger und Phosphorsäure.

δ) Phosphorpentoxyd P_4O_{10}. — Phosphorpentoxyd ist bei der lebhaften Verbrennung des Phosphors das Hauptprodukt. Es ist so lange bekannt, wie der Phosphor selbst, seine Natur wurde aber erst durch die Untersuchungen von Lavoisier und Scheele erkannt. Scheele führte Phosphor durch Oxydation in Phosphorsäure über. — Technisch wird Phosphorpentoxyd durch Oxydation in eisernen Trommeln gewonnen.

Das technische Pentoxyd ist ein weißes, schneeartiges Pulver, das meist etwas Trioxyd und Metaphosphorsäure enthält; man reinigt es durch Sublimieren im Sauerstoffstrom. Bei 250° erfolgt ziemlich rasche Vergasung, an kalten Stellen setzen sich kleine, stark lichtbrechende, monokline Kristalle ab. Beim Erhitzen auf höhere Temperatur (440°; Schwefeldampf) findet Umwandlung in eine andere (polymere?) Modifikation statt. Das Oxyd wird pulvrig, amorph, die Flüchtigkeit ist vermindert. Eine weitere Umwandlung tritt bei Rotglut ein, die Masse wird glasig (ob hier eine neue Modifikation vorliegt, ist zweifelhaft). Das glasige Pentoxyd ist erst bei Weißglut flüchtig, aus dem Dampf scheidet sich kristallisiertes Oxyd aus. Die Dampfdichte entspricht der Formel P_4O_{10}. Phosphorpentoxyd phosphoresziert nach Belichtung mit intensiv grünem Licht. Die Erscheinung ist als Photolumineszenz zu betrachten. Oxydation von beigemischtem Trioxyd kann nicht die Ursache sein, da das Leuchten auch in sauerstofffreien Gasen und im Vakuum stattfindet. Die Intensität nimmt mit sinkender Temperatur zu. Bei —180 erhält man eine glänzende Erscheinung. Die Brechbarkeit des Phosphoreszenzlichtes ist geringer als die des erregenden Lichtes. Das Pentoxyd ist sehr hygroskopisch, es ist eines der wirksamsten und gebräuchlichsten Trockenmittel, besonders für Gase. Die Lösungswärme in Wasser ist für die verschiedenen Modifikationen verschieden, nach Giran für die kristalline 40,79, für die amorphe 33,81, für die glasige 29,09 Cal. — P_2O_5 entzieht wasserstoff- und sauerstoffhaltigen Substanzen Wasser, aus Säuren entstehen so Säureanhydride (aus Salpetersäure N_2O_5, aus Schwefelsäure SO_3); das Pentoxyd geht hierbei hauptsächlich in Metaphosphorsäure über, außerdem aber entstehen durch weitere Wasseraufnahme Pyro- und Orthosäure. Phosphorpentoxyd gibt die Reaktionen der Säureanhydride; Salzsäure gibt Oxychlorid (das Chlorid der Orthosäure) neben Metaphosphorsäure: $P_4O_{10} + 3HCl = POCl_3 + 3HPO_3$. Mit Ammoniak bildet sich die Pyrophosphordiaminsäure. Mit Phosphorpentachlorid entsteht Oxychlorid.

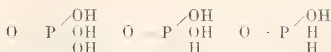
Kohle reduziert bei hoher Temperatur zu Phosphor, leicht oxydable Metalle geben Phosphid, Phosphat, Metalloxyd. Metalloxyde reagieren erst bei höherer Temperatur. Natriumoxyd gibt bei 100°, Bariumoxyd bei 250° heftige Reaktion. Mit SO_3 wird die Molekularverbindung $P_2O_5 \cdot SO_3$ gebildet.

8e) Die Säuren des Phosphors. α) Allgemeines. Die Oxyde des Phosphors vereinigen sich mit Wasser zu Hydraten, den Phosphorsäuren; z. B. Pentoxyd nach den Formeln:


$P_4O_{10} + 6H_2O = 4H_3PO_4$ (Orthophosphorsäure)
$P_4O_{10} + 4H_2O = 2H_4P_2O_7$ (Pyrophosphorsäure)
$P_4O_{10} + 2H_2O = 4HPO_3$ (Metaphosphorsäure)

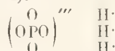
In derselben Weise leiten sich vom Trioxyd die phosphorige, die pyro- und metaphosphorige Säure ab (H_3PO_3 usw.). Neben diesen beiden Reihen existiert noch die Unterphosphorsäure H_2PO_3, die als das Hydrat des Tetroxyds erscheinen könnte, aus dem sie aber nicht entsteht (s. o.), und schließlich die unterphosphorige Säure H_3PO_2. — Die Mannigfaltigkeit der Phosphorsäuren wird noch vermehrt durch die Isomeriefälle bei den Salzen der Metaphosphorsäure.

Von Interesse ist der verschiedene Charakter, der den Wasserstoffatomen in den Hydraten der P-Oxyde zukommt. Die Säuren H_3PO_4, H_3PO_3, H_3PO_2 besitzen alle gleich viele H-Atome und doch ist die Phosphorsäure eine 3-basische, die phosphorige Säure eine 2-basische und die unterphosphorige Säure eine 1-basische Säure. Man bringt dies durch die Formeln:

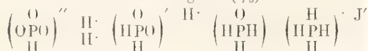


zum Ausdruck; nur dem OH-Wasserstoff kommen saure Eigenschaften zu. Die Konstitution wird durch Esterverseifung ermittelt: Oxalkyl wird als Alkohol abgespalten, direkt gebundenes Alkyl bleibt im Molekül; es ist aber zu bedenken, daß die Säuren in tautomeren Formen, die im Gleichgewicht stehen, zu reagieren vermögen.

Eine sehr einleuchtende Erklärung der Abhängigkeit der Basizität vom O-Gehalt bietet sich, wenn man die Phosphorsäuren nach Werner als komplexe Verbindungen auffaßt. Das Phosphorsäure-Anion besteht dann aus einem P-Atom als Zentralatom, dem als „Neutralteile" vier Sauerstoffatome angelagert sind („Koordinationszahl" 4):



Wird durch Abgang eines O-Atoms ein Platz in der „inneren Zone" frei, so wird er von einem H-Atom der „äußeren Zone" eingenommen: man hat nur noch 2 Kationen und ein Anion von verminderter Wertigkeit ($^2/_3$) usw.:



Die vorletzte Verbindung ist nicht bekannt, wohl aber ihre organischen Substitutionsprodukte, die Phosphinoxyde $(CH_3)_3PO$, $(C_2H_5)_3OO$; s. S. 558. Die letzte Verbindung dagegen ist wieder ohne Alkylsubstitution existenzfähig, es ist das Phosphoniumjodid; das PH_4-Kation neigt zwar sehr zur Spaltung in PH_3 und H·-Ion, ist aber in stark saurer Lösung sicher vorhanden; durch Alkylsubstitution entstehen äußerst beständige und starke Kationen. — Die Reihe entspricht völlig der Reihe der $PtCl_4$-NH_3-Verbindungen (vgl. den Artikel „Valenzlehre").

β) Unterphosphorige Säure H_3PO_2. Die unterphosphorige Säure entsteht bei der Darstellung des PH_3 aus Laugen (am besten Barytwasser) und weißem Phosphor: das Ba-Salz wird mit H_2SO_4 zersetzt; die freie Säure muß schließlich in Platinschalen konzentriert werden. — Die Säure wurde 1816 von Dulong entdeckt.

Die unterphosphorige Säure bildet große blättrige Kristalle, die bei 17,4° zu einer zähen Flüssigkeit schmelzen (nach sorgfältigem Trocknen bei 26,5°). Die Dichte der Schmelze bei 18,8° ist 1,493; die molekulare Schmelzwärme beträgt 2,4 Cal. In Wasser löst sich die Säure leicht auf, die feste unter Wärmeverbrauch (0,17 Cal.), die flüssige unter Wärmeabgabe (2,41 Cal.).

Die unterphosphorige Säure ist eine einbasische mittelstarke Säure:

v	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024 l
λ	140	172	207	245	281	313	335	352	361	367

Der Temperaturkoeffizient ist zuerst positiv, dann negativ, bei ca. 54° liegt ein Maximum der Leitfähigkeit: $d\lambda/dt$ bei 25° $+ 0,66$, bei 54° $-0,08$, bei 87° $-0,42$ ($\lambda_{25} = 118,7$). Dieser Temperaturgang erklärt sich durch Ueberkompensation der steigenden Ionenbeweglichkeit durch die abnehmende Dissoziation (positive Ionisationswärme). Aus den Temperaturkoeffizienten berechnet man bei 21,5° 3,21 Cal, bei 35° 3,656 Cal. für die Dissoziationswärme.

Diese Erscheinungen stehen in Uebereinstimmung mit dem Verhalten bei der Neutralisation. Die dabei auftretende Wärmetönung berechnet sich nach der Formel: $N = 13\,520 - (1-d)\,q$; hierin ist q die Dissoziationswärme, d der Grad der Dissoziation, 13520 die Wärmetönung bei völlig dissoziierten Komponenten (vgl. den Artikel „Thermochemie").

Temp.	d	(1—d)q	N(ber.)	N(beob.)
21,5°	0,449	—1769	15289	15316
35°	0,397	—2207	15727	—

Beim Erhitzen erfolgt Zerfall nach der Gleichung: $2H_3PO_2 = PH_3 + H_3PO_4$; die Reaktion soll in zwei Stufen (über H_3PO_3) bei 135° und 165° verlaufen.

Die unterphosphorige Säure kann mit Zink und Salzsäure zu PH_3 reduziert werden, wichtiger sind die Reaktionen, wo sie selbst als Reduktionsmittel wirkt, wobei sie in H_3PO_3 und H_3PO_4 übergeht. Eine Kette Pt | 0,2-n NaH_2PO_2 | KCl | HgCl | Hg ergibt die Potentialdifferenz 0,044 Volt, gegen die H_2-Elektrode berechnet man 0,267 Volt. Die Werte sind nicht definiert, da Angaben über die Konzentration der Oxydationsprodukte fehlen; immerhin ergibt sich, daß unter den angegebenen Verhältnissen die Hypophosphitlösung ein schwächeres Reduktionsmittel ist als Wasserstoff. Durch OH′-Ionen kann aber, wie bei allen Reduktionsmitteln, die Wirkung gesteigert werden: schon Rose beobachtete, daß sich die Lösungen der Hypophosphite beim Erhitzen mit Alkalien unter H_2-Entwickelung oxydieren ($H_2PO_2' + H_2O = H_2PO_3' + H_2$), in neuerer Zeit wurde die Reaktion von Sieverts genauer studiert. Sie verläuft bei 90 bis 100° als Reaktion 1. Ordnung mit normalem Temperaturkoeffizienten, die Geschwindigkeit nimmt rascher zu als die Alkalikonzentration, als Reaktionsprodukt tritt im homogenen System nur Phosphit auf (Treadwell gibt an, daß mit festem Alkali auch Phosphat entstehe); das Alkali wirkt wie ein Katalysator.

Unterphosphorige und phosphorige Säure zeigen in ihrem reduktiven Verhalten viel Gemeinsames, sie werden deshalb im folgenden zum Teil zusammen behandelt. Beide Säuren, besonders phosphorige Säure, sind gegen viele Oxydationsmittel außerordentlich beständig: Salpetersäure, selbst rauchende, wirkt nur langsam ein, Chromsäure, Wasserstoffsuperoxyd, Kaliumpermanganat, Ferrisalze und Merkurisalze verhalten sich ähnlich. Königswasser und Bromwasser oxydieren bei Wasserbadtemperatur ziemlich rasch; die beste maßanalytische Methode ist die Oxydation mit Jod. Gegen Luftsauerstoff sind die Lösungen wenig empfindlich.

Von besonderem Interesse ist die katalytische Beeinflussung der Oxydation. Diese tritt mit wenigen Ausnahmen bei der Reduktion von Edelmetallsalzen auf; es sind dann zwei Vorgänge zu unterscheiden, die nebeneinander verlaufen: einmal die Oxydation durch Edelmetallsalz (die quantitativ dem gefällten Metall entspricht), zweitens die katalytische Oxydation durch den Sauerstoff des Wassers.

Goldsalze. Unterphosphorige und phosphorige Säure scheiden Gold aus; es wird genau so viel Säure oxydiert, als dem Uebergang des dreiwertigen Ions in metallisches Gold entspricht; das gefällte Gold bewirkt die Oxydation einer siedenden Lösung von unterphosphoriger Säure.

Silbersalze. Dasselbe gilt für Ag_3PO_4; AgH und Silbersuboxyd wird nicht gebildet, sondern direkt Metall.

Kupfersalze. Mit unterphosphoriger Säure verläuft die Reaktion verschieden, je nachdem, ob das Cu-Salz oder die Säure im Ueberschuß ist: im ersten Fall entsteht nur metallisches Cu, im zweiten zunächst CuH, der weiterhin nicht in CuH_2, sondern ebenfalls in metallisches Cu übergeht. Das gefällte Cu katalysiert in der Siedehitze. $CuCl_2$ gibt CuCl, mit Säureüberschuß CuH. — Mit phosphoriger Säure entsteht metallisches Kupfer, $CuCl_2$ gibt CuCl; $CuSO_4$-haltige Lösungen werden durch Luftsauerstoff oxydiert.

Palladiumsalze. $PdCl_2$ wird durch beide Säuren in der Kälte reduziert. Hypophosphitlösungen werden schon bei Zimmertemperatur durch gefälltes Pd katalysiert; es entsteht Phosphit, das sich beim Sieden langsam weiter oxydiert (in alkoholischer Lösung keine Oxydation).

Nickel- und Kobaltsalze. Die Salze werden nicht reduziert. Die Metalle (mit H_2 reduziert) katalysieren die Oxydation des Hypophosphits.

Platinsalze. $PtCl_4$ wird nicht reduziert. Platinschwarz katalysiert nicht (eine geringe Wirkung durch den O-Gehalt des Pt-Schwamms).

Es ergibt sich für die katalytische Wirksamkeit die Reihenfolge: Palladium (schon bei Zimmertemperatur); Kobalt und Nickel (ebenso); Gold, Silber, Kupfer (auch bei 100° nur langsam); Platin (ohne Wirkung).

Die Art und Weise der katalytischen Wirkung ist noch nicht ganz aufgeklärt; besonderes Interesse beansprucht die Tatsache, daß die Metalle, die H_2 lösen (CO, Ni und besonders Pd), auch gute Katalysatoren sind, ferner die Ausnahmestellung des Platins; früher sah man in bestimmten H-Verbindungen der Metalle (CuH_2, AgH) die Ursache der Katalyse, doch wurde nachgewiesen (Sieverts), daß diese Hydride nicht gebildet werden (AgH, CuH_2) oder bald zerfallen (CuH); ob und wie stark gelöstes H_2 die Katalyse beeinflußt, ist nicht festgestellt, jedenfalls sind auch Metalle wirksam, bei deren Darstellung H_2 mit Sicherheit ausgeschlossen war. Man hat also in der Katalyse eine spezifische Wirkung des Metalls zu sehen und zwar genauer des amorphen (kristallinisch gefälltes Cu katalysiert nicht); ein Versuch, mit kolloidalem Pd zu arbeiten, mißlang, da das Pd in Gegenwart von Hypophosphit bald ausfällt. Bei diesem Versuch sollte die Katalyse im homogenen System studiert werden, einen gewissen Ersatz bietet die Oxydation in alkalischer Lösung (s. o.). Das Pd ermüdet und kann durch Waschen und Trocknen an der Luft bei 100° beinahe völlig auf seine ursprüngliche Wirksamkeit gebracht werden.

Genau studiert ist die Oxydation durch Jod (Steele). Die Oxydation verläuft in alkalischer und saurer Lösung verschieden, im ersten Fall entsteht Phosphat, im zweiten nur Phosphit. Die Oxydation zu Phosphit wird durch H˙-Ionen katalysiert: eine Lösung von unterphosphoriger Säure (0,05-n) mit HCl (0,2-n) wurde durch Jod (0,005-n) in 19 Minuten oxydiert; durch Zusatz von Natriumacetat (0,2-n) wurde die Dauer auf 10 Tage verlängert. Die Geschwindigkeit ist von der Konzentration des Jods unabhängig (jedenfalls wenn diese größer als 0,004-n ist), dagegen proportional der Konzentration des H_3PO_2. Ohne Zusatz von HCl autokatalytische Beschleunigung durch die H˙-Ionen des gebildeten HJ; mit Zusatz von HCl Reaktion 1. Ordnung, Temperaturkoeffizient der Geschwindigkeit zwischen 18° und 25° 3,1 (für 10°). — Im Gegensatz hierzu wird die Oxydation der H_3PO_3 durch Natriumacetat stark beschleunigt; in stark saurer Lösung ist die Geschwindigkeit proportional der Konzentration der H_3PO_3, proportional der Quadratwurzel der Jodkonzentration (Jodatome?), Beschleunigung durch H˙-Ionen (Autokatalyse); nach Zusatz von Natriumacetat wird die Reaktion sehr komplex.

Von Interesse ist auch die Oxydation der H_3PO_3 durch $K_2S_2O_8$ unter Zusatz von Jod. Ohne Jod findet die Oxydation mit unmeßbar kleiner Geschwindigkeit statt, dagegen wird sowohl H_3PO_3 durch Jod, als HJ durch $K_2S_2O_8$ mit größerer Geschwindigkeit oxydiert: durch den Vorgang $J \rightarrow J' \rightarrow J$ vermag also das Jod die Oxydation durch Persulfat zu beschleunigen.

Konzentrierte H_2SO_4 wird zu SO_2 und Schwefel reduziert, die H_3PO_2 geht in H_3PO_4 über; PCl_3 wird zu Phosphor reduziert.

Die Salze der H_3PO_2 (einbasisch) heißen Hypophosphite; die der Alkalien und alkalischen Erden entstehen beim Kochen der Hydroxyde mit P, die der Schwermetalle durch Umsatz des Ba-Salzes mit Sulfaten; sie sind in neutraler Lösung beständig, in alkalischer (s. o.) gehen sie unter H_2-Entwickelung in Phosphite über; in Wasser sind alle, auch die der Schwermetalle leicht löslich (große Elektroaffinität des H_2PO_2-Anions; Abegg und Bodländer). Beim Erhitzen entstehen Pyro- und Metaphosphate, es entwickelt sich H_2 und PH_3. Auch Doppelsalze sind bekannt, z. B. $Ca_2Co(H_2PO_2)_6 \cdot 2H_2O$. Ester kennt man nicht, dagegen Alkylderivate, in denen ein H-Atom des Anions durch Alkyl ersetzt ist, die Alkylphosphinsäuren: $(CH_3)_2PO_2H$; s. S. 558.

γ) Phosphorige Säure H_3PO_3. Bei der langsamen Oxydation von Phosphor an der Luft entsteht neben H_3PO_4 und H_2PO_3 hauptsächlich H_3PO_3. Die Trennung ist schwierig und man benützt deshalb zur Reindarstellung die Umsetzung: $3H_2C_2O_4$ (Oxalsäure) $+ PCl_3 = H_3PO_3 + 3CO + 3CO_2 + 3HCl$ (Erhitzen am Rückflußkühler).

H_3PO_3 ist gewöhnlich eine farblose kristalline Masse, bei langsamen Abkühlen können auch große Kristalle erhalten werden.

Die Säure schmilzt bei 71° zu einer syrupösen Flüssigkeit, die sich leicht unterkühlen läßt; Schmelzwärme 3,1 Cal. Die Substanz ist sehr hygroskopisch und in Wasser leicht löslich; Lösungswärme: (fest) —0,13 Cal., (flüssig) + 2,96 Cal.

Die phosphorige Säure ist eine 2-basische Säure, aber fast nur einstufig dissoziiert:

$v =$	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024
$\lambda =$	129	156	187	222	257	292	318	337	351	358

Beim Erhitzen findet Zerfall statt: $4H_3PO_3 = 3H_3PO_4 + PH_3$. Naszierender H reduziert zu PH_3. Ein Anhalt für die Reduktionskraft wird durch die Potentialdifferenz der Kette: Pt Na_2HPO_3 0,2-n KCl | HgCl Hg gegeben; sie beträgt 0,033 V., doch ist dieser Wert nicht genau definiert, da Angaben über die Konzentration der Oxydationsprodukte fehlen. In alkalischer Lösung wird kein H_2 entwickelt, die Reduktionskraft ist also geringer als bei der unterphosphorigen Säure, doch werden die Edelmetalle gefällt; SO_2 wird zu H_2S reduziert (vgl. S. 564).

Die Säure bildet primäre und sekundäre Salze, die Phosphite, die beim Erhitzen in Pyro- und Orthophosphate zerfallen; sie sind mit Ausnahme der Alkali- und Erdalkalisalze schwer löslich: geringe Elektroaffinität des Anions. Der geringen Elektroaffinität entspricht die Neigung zur Bildung von Komplexionen: Natriumphosphit löst (wie AsO_2Na) in alkalischer Lösung Niederschläge von Cd-Co-Ni-Fe-Cu-phosphiten wieder auf.

Bei den Alkylderivaten der phosphorigen Säure sind die Ester und die im Anion substituierten Alkylphosphorsäuren zu unterscheiden. Die Alkylphosphorsäuren entstehen durch Oxydation der primären Phosphine: $[CH_3PO_3]H_2$; es sind zweibasische Säuren, von denen saure und neutrale Ester bekannt sind. Ein saurer Ester entsteht z. B. aus Bleiphosphit mit Jodäthyl: $(C_2H_5PO)OC_2H_5.OH$; das Na-salz dieses sauren Esters gibt bei nochmaliger Behandlung mit Jodäthyl: $(C_2H_5PO)(OC_2H_5)_2$. Dieser Ester, der unsymmetrische, ist isomer mit dem symmetrischen, der aus $NaOC_2H_5$ und PCl_3 entsteht: $P(OC_2H_5)_3$. Von den Estern der phosphorigen Säure sind nur saure bekannt von der Form $(PO_3H)HR$, wo R ein Aryl ist: $(PO_3H)HC_6H_5$, Phosphenilsäure; einbasische Säure, aus Phosphenyltetrachlorid und Wasser. — Die Isomerie der Ester hat zur Aufstellung der Formeln $P(OH)_3$ [symmetrisch] und $OP(OH)_2H$ [asymmetrisch] geführt; die Säure ist tautomer, in Lösung wird die asymmetrische Form bei Reaktionen bevorzugt.

Pyrophosphorige Säure, $H_4P_2O_5$. — Die Säure entsteht durch Umsetzung von PCl_3 mit $P(OH)_3$ bei 30 bis 40°. Sie bildet farblose hygroskopische Kristalle, die bei 38° schmelzen; Sie geht beim Lösen in Wasser in phosphorige Säure über. Das saure Salz geht bei 160° in Pyrophosphat über.

Metaphosphorige Säure. HPO_2. — Sie entsteht bei der langsamen Oxydation des PH_3, wenn man unter vermindertem Druck (25 mm) gleiche Volumina PH_3 und O_2 ineinander diffundieren läßt: $PH_3 + O_2 = HPO_2 + H_2$. Es bilden sich an den Wänden federförmige hygroskopische Kristalle, die etwas über 80° schmelzen. Mit Wasser geht die Säure sofort in phosphorige Säure über.

δ) Unterphosphorsäure H_2PO_3. — Die Säure entsteht neben H_3PO_3 und H_3PO_4 bei der langsamen Oxydation des Phosphors; man arbeitet mit möglichst großer Oberfläche des Phosphors und vermindertem Luftzutritt (Phosphorstangen in Glasröhren); die Lösung wird mit Natriumacetat versetzt, worauf das saure Salz auskristallisiert; die freie Säure wird aus dem Pb-Salz mit H_2S oder aus dem Ba-Salz mit H_2SO_4 gewonnen.

Der aufgewendete Phosphor geht etwa zum fünften Teil in H_2PO_3 über; das Verhältnis zu den andern Oxydationsprodukten ist von der Temperatur abhängig. Auch bei der Oxydation von geschmolzenem Phosphor mit Nitratlösungen [$Cu(NO_3)_2$, $AgNO_3$] und HNO_3 wird H_2PO_3 gebildet. Aus der Lösung scheiden sich Kristalle von der Zusammensetzung $H_2PO_3.H_2O$ ab; sie schmelzen bei 70°, die wasserfreie hygroskopische Säure schmilzt bei 55°.

Die wasserfreie Säure und ihre Hydrate zerfallen beim Erhitzen in phosphorige Säure und Metaphosphorsäure; in Lösung entsteht langsam, beim Kochen mit Säuren schnell, phosphorige und Phosphorsäure.

Die reduzierende Wirkung der Unterphosphorsäure ist weit schwächer als die der phosphorigen und besonders der unterphosphorigen Säure: Gold- und Silbersalze werden nicht gefällt, H_2O_2 und Chromsäure reagieren nicht, Permanganatlösung wird nur langsam entfärbt. — Auch gegen Reduktionsmittel ist sie ziemlich beständig: SO_2 und nascierender Wasserstoff sind ohne Wirkung.

Welche Molekulargröße der Unterphosphorsäure zukommt (H_2PO_3 oder $H_4P_2O_6$), ist noch nicht sicher festgestellt. Für die Formel $H_4P_2O_6$ wird das Salz $Na_3H(PO_3)_2 . 9H_2O$ angeführt. Die Säure könnte dann in Analogie zur Unterschwefelsäure als gemischtes Anhydrid der phosphorigen Säure und der Phosphorsäure angesehen werden: $H_2O_3P - PO_3H_2$. Für die einfache Formel dagegen sprechen Leitfähigkeitsbestimmungen und die Molekulargewichtsbestimmung des Methyläthers (Siedepunktserhöhung).

Für den Methyläther wurde ein Molekulargewicht zwischen 105 und 125,5 gefunden in Annäherung an den Wert 109 für $(CH_3)_2PO_3$.

Die Leitfähigkeit des primären Na-Salzes ist:

$v =$	16	32	64	128	256	512	1024
$\lambda =$	40,8	44,0	47,2	50,1	53,0	56,0	60,8

Also nach der Ostwaldschen Regel:

$$n_\alpha = \frac{\lambda 1024 - \lambda 32}{10 \, . \, n_\alpha} = \frac{16{,}8}{10} = 1{,}68.$$

Danach würde das Salz $Na_3H(PO_3)_2 . 9\,H_2O$ als komplexes Salz aufzufassen sein. Das Neutralsalz ist hydrolytisch gespalten (alkalische Reaktion und großer Zuwachs der Leitfähigkeit beim Zusatz des 2. Alkaliäquivalents).

Die Anionen sind schwach (Schwerlöslichkeit der Anhydrosalze mit Ausnahme der Alkalisalze, Hydrat- und Komplexbildung).

Die neutralen wasserfreien Salze geben beim Erhitzen Pyrophosphat und Phosphid, die wasserhaltigen PH_3 und H_2.

Aus dem Ag-Salz entsteht mit Jodmethyl der Methylester der Unterphosphorsäure.

ε) Phosphorsäure H_3PO_4. Die wichtigste Säure des Phosphors ist die Phosphorsäure; auf die Bedeutung des phosphorsauren Kalks für die Vegetation wurde schon wiederholt hingewiesen. Ausführliches findet man im Artikel „Düngemittel".

Die Darstellung der freien Säure erfolgt aus Calciumphosphat nach einem Verfahren, das schon von Scheele und Gahn benutzt wurde (s. o.): man digeriert das Phosphat mit verdünnter Schwefelsäure, zieht die gebildete Phosphorsäure von dem Gips ab, dampft ein und versetzt mit konzentrierter H_2SO_4; durch mehrmalige Behandlung in dieser Weise wird das Ca ganz ausgeschieden, die H_2SO_4 wird durch Glühen entfernt; das Produkt enthält fast stets Magnesium und die Verunreinigungen der Schwefelsäure. Reine Säure erhält man durch Oxydation des Phosphors mit HNO_3; man kocht gewöhnlichen Phosphor am Rückflußkühler mit Säure vom spezifischen Gewicht 1,2 (1 Teil Phosphor: 16 Teile Säure), stärkere Säure wirkt zu heftig, Jodzusatz beschleunigt; die Säure wird abdestilliert und der Rückstand mit konz. HNO_3 behandelt, um phosphorige Säure zu oxydieren; Arsen wird mit H_2S entfernt; die letzte Konzentration erfolgt in Platin- oder Goldschalen, da Porzellan angegriffen wird; durch Konzentration bei 150° erhält man einen Sirup, der von selbst oder durch Impfen erstarrt.

Auch durch Lösung des P_2O_5 in Wasser wird H_3PO_4, über Zwischenstufen (vgl. S. 563) als Endprodukt erhalten.

Die Phosphorsäure löst sich leicht in Wasser unter Wärmeentwickelung; die Lösungswärme der festen Säure beträgt 2,69 Cal., die der flüssigen 5,21 Cal. Schon die Wärmetönungen beim Lösen mit abgestuften Wassermengen sprechen für Hydratbildung:

$H_3PO_4 . nH_2O$	n =	0	3	20	100
$+ mH_2O$	m =	100	97	80	100
gibt		5,27	1,97	0,33	0,09 Cal.

Genau wurde das System $H_3PO_4 - H_2O$ von Smith und Menzies untersucht; sie stellten außer dem schon länger bekannten Jolyschen Hydrat, $2H_3PO_4 . H_2O$, ein Dezihydrat, $10H_3PO_4 . H_2O$, fest: die Kurve verläuft vom Fp. der reinen H_3PO_4 über einen Umwandlungspunkt des Dezihydrats (26,2°) zum Eutektikum der beiden Hydrate (23,5°), steigt von dort zum Fp. des Jolyschen Hydrats (29,35°) und fällt dann andauernd (die Beobachtung ging bis —16,3°). Das Jolysche Hydrat wird leicht bei tiefen Temperaturen erhalten; das Dezihydrat stellt man dar, indem man Phosphorsäure auf 96% konzentriert und bei 24,38° die Kristallisation einleitet. — Komplexbildung wie bei Pyro- und Metasäure tritt nicht ein, die Gefrierpunktserniedrigung entspricht einfachen Molekeln.

Die Phosphorsäure ist eine dreibasische Säure. Die Dissoziations- und Leitfähigkeitsverhältnisse der Phosphorsäure, der Pyro- und Metasäure und der verschiedenen Salze sind von Abbott und Bray eingehend studiert worden unter Verwendung interessanter Methoden (Journ. Amer. Chem. Soc. **31**, 730).

Die Grundlage der Berechnungen bildete die Bestimmung der Hydrolyse von Ammonsalzen der Phosphorsäuren, indem die Lösungen mit Chloroform ausgeschüttelt wurden und aus der Konzentration des NH_4OH im $CHCl_3$ auf die in der Lösung geschlossen wurde (Verteilungssatz). Mit Hilfe des Wasser- und des Ammoniakgleichgewichtes geht die Dissoziationsformel z. B. des 3. H˙-Atoms

$$K_3 = \frac{(H+)(PO_4^{---})}{(HPO_4^{--})} \quad \text{über in}$$

$$K_3 = \frac{Kw.(NH_4+)(PO_4^{---})}{Kb.(NH_4OH)(HPO_4^{--})}.$$

Nimmt man die Hydrolysengleichung hinzu:

$$Na_2NH_4PO_4 + H_2O = NH_4OH + Na_2HPO_4$$

so erhält man:

$$\left.\begin{array}{l}(NH_4OH) + (OH-) \\ (HPO_4^{--}) + (HPO_4\text{-Salze})\end{array}\right\} = Ch$$

$$(PO_4^{---}) + (PO_4\text{-Salze}) = C(1-h)$$

$$(NH_4+) + (NH_4OH) + (NH_4\text{-Salze}) = C$$

wobei C = die Konzentration, h = den Hydrolysengrad bedeutet. Damit hat man, zunächst unter Vernachlässigung der undissoziierten Salze alle zur Berechnung von K_3 nötigen Daten.

Im folgenden werden die wichtigsten Resultate angegeben; die Ableitung im einzelnen muß im Original nachgesehen werden.

Hydrolysengrad in %:

milli-Mol. im Liter	100	50	20
$Na_2NH_4PO_4$	96,03	96,10	97,30
$NaHNH_4PO_4$	2,95	3,02	
$Na_3NH_4P_2O_7$	10,57	13,15	17,34
$Na_2(NH_4)_2P_2O_7$	—	17,85	23,03
$Na_2HNH_4P_2O_7$	—	2,33	2,47

(Hierher die Tabelle von der nächsten Seite.)

Es ergibt sich, daß die Phosphorsäure in der 1. Stufe eine ziemlich starke Säure (wie H_2SO_4) ist, in der 2. Stufe dagegen zwischen H_2CO_3 und H_2S steht, und in der 3. Stufe ganz schwach ist, zwischen HCO_3^- und HS^-.

Dieselben Schlüsse lassen sich auch aus den Neutralisationswärmen ziehen:

Ionisationskonstanten bei 18⁰ (zum Vergleich die einiger anderen Säuren):

Säure	Dissoziationsvorgang	Konstante
Orthophosphorsäure	*$H_2PO_4^-$ + H^+	$1,1 \cdot 10^{-2}$
,,	HPO_4^{--} + H^+	$1,95 \times 10^{-7}$
,,	PO_4^{---} + H^+	$3,6 \times 10^{-13}$
Pyrophosphorsäure	*$H_3P_2O_7^-$ + H^+	$1,4 \times 10^{-1}$
,,	*$H_2P_2O_7^{--}$ + H^+	$1,1 \times 10^{-2}$
,,	$HP_2O_7^{---}$ + H^+	$2,9 \times 10^{-7}$
,,	$P_2O_7^{----}$ + H^+	$3,6 \cdot 10^{-9}$
Salzsäure	*Cl^- + H^+	6×10^{-1}
Bisulfation	**SO_4^{--} + H^+	$1,9 \times 10^{-2}$
Essigsäure	$C_2H_3O_2^-$ + H^+	$1,8 \times 10^{-5}$
Kohlensäure	HCO_3^- + H^+	$3,0 \times 10^{-7}$
Bikarbonation	CO_3^{--} + H^+	$6,0 \times 10^{-11}$
Schwefelwasserstoff	HS^- + H^+	$9,1 \cdot 10^{-8}$
Sulfhydration	S^{--} + H^+	$1,2 \times 10^{-15}$
Borsäure	$H_2BO_3^-$ + H^+	$1,7 \times 10^{-9}$

*) Die Konstanten nehmen mit abnehmender Ionenkonzentration ab; Aequivalentkonzentration 0,026. **) Aequivalentkonzentration 0,016.

1 H_3PO_4aq +	Th.†	1 $H_4P_2O_7$aq +	Th.
0,5 NaOH aq	7 530		
1,0	14 830	1 NaOH aq	14 380
2,0	27 080	2	28 650
3,0	34 030	4	52 740
6,0	35 280	6	54 480

* 13 700 ist die normale Neutralisationswärme für 1 Aequivalent völlig dissoziierter Säuren.
† Thomsen.

Endlich stehen die Befunde in Uebereinstimmung mit dem Verhalten bei der Titration. Die Indikatoren sind Reagenzien auf Wasserstoffionenkonzentrationen (Salm, ZS. phys. Ch. 56) und es muß sich deshalb die Phosphorsäure bei geeigneter Wahl des Indikators ein-, zwei- und dreibasisch titrieren lassen, wie es auch tatsächlich der Fall ist: mit Methylorange (einbasisch), Phenolphtalein (zweibasisch), Trinitrophenol (dreibasisch).

Die Konzentration der H-Ionen wurde von Salm, von Ringer und von Prideaux durch Kombination mit einer H_2-Elektrode und Messung der Potentialdifferenz bestimmt:

(Prideaux)

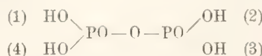
$NaH_2PO_4 = 1,0-2,0 \cdot 10^{-4}$
$Na_2HPO_4 = 1,5 \times 10^{-9}$
$Na_3PO_4 = 5,9 \times 10^{-13}$

(Ringer)

$H_3PO_4 = 1,08 \times 10^{-2}$
$NaH_2PO_4 = 5,5 \times 10^{-5}$
$Na_2HPO_4 = 5,3 \times 10^{-}$[illegible]
$Na_3PO_4 = 8,7 \cdot 10^{-12}$

Für die Pyro-Säure ergibt sich: die 1. Dissoziation ist sehr stark; die 2. Dissoziation ist wie die erste der Orthosäure; die 3. Dissoziation ist schwach wie die von H_2PO_4'; die 4. Dissoziation ist noch schwächer, aber nicht so schwach wie die von HPO_4''. Zwei Aequivalente können mit Methylorange titriert werden, das dritte aber nicht mit Phenolphthalein, da die 4. Dissoziation hinzukommt.

Das Verhalten der Pyro-Säure ist in Uebereinstimmung mit der Formel



wenn man dieselbe nach den Ostwaldschen Anschauungen über den Einfluß der Distanz der Ladungen (Dikarbonsäuren) auf die Dissoziation interpretiert. Danach müßte zwischen der 1. und 2. sowie zwischen der 3. und 4. Dissoziation kein großer Unterschied sein, wohl aber zwischen der 2. und 3.; die 2. und 3. müßte der 1. und 2. der Orthosäure entsprechen, der Unterschied der 3. und 4. müßte geringer sein als der der 2. und 3. der Orthosäure — wie es ja auch in der Tat gefunden wird.

Die folgenden Tabellen zeigen den Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit der Phosphorsäure über alle Konzentrationen

%-Gehalt	% dissoziiert	spez. Leitfähigkeit $k^0 \cdot 10^4$	Molekulare Leitfähigkeit.
1,4	40,63	140,0	97,50
38,49	12,40	1459,2	29,77
43,26	10,95	1491,6	26,28
48,9	9,07	1444,9	21,77
*100	0,30	140,6	0,73

* Die 100%-Säure reagiert weder mit Lackmus noch mit Na_2CO_3.

Bei größeren Verdünnungen hat man (molekulare Leitfähigkeit bei 25⁰):

v	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048
λ	64	77	96	124	156	195	240	279	317	341	378

Bei höheren Konzentrationen nimmt die Leitfähigkeit rasch ab:

%-Gehalt	Aequivalentleitfähigkeit	
30	15,20	28°
50	10,17	
70	4,42	
85	1,749	
90,5	0,083	29,3°
95,3	0,069	
98,8	0,061	

Die Leitfähigkeiten der verschiedenen Anionen betragen (bei 18°):

Anion	Leitfähigkeit Molekulare	Leitfähigkeit Aequivalente
H_2PO_4 -	26,4 ± 1,0	26,4 = 1 × 26,4
HPO_4 - -	106,8 ± 2,0	53,4 = 2 × 26,7
PO_4 - - -	205,0 ± 30,0	69,0 = 3 × 23,0

Anion	Leitfähigkeit Molekulare	Leitfähigkeit Aequivalente
$H_3P_2O_7$ -	*(20,4 ± 1,0)	(20,4 = 1 × 20,4)
$H_2P_2O_7$ - -	83,3 ± 1,0	41,6 = 2 × 20,8
HP_2O_7 - - -	179,2 ± 4,0	59,7 = 3 × 19,9
P_2O_7 - - - -	325,6 ± 10,0	81,4 = 4 × 20,3

*geschätzt.

Also: Aequivalentleitfähigkeit proportional Ladung; das war zu erwarten, wenn die Ionen gleichen Reibungswiderstand haben.

Wie die unterphosphorige Säure besitzt die Phosphorsäure ein Maximum der Leitfähigkeit bei steigender Temperatur (vgl. S. 564). Die Tabelle bezieht sich auf 3-n Säure:

Temperatur	12°	23°	33°	45°	55°	61°	67°	72°	76°	81°	85°	89°
Molekulare Leitfähigkeit	50,2	56,9	62,0	66,3	69,0	70,0	70,7	71,0	71,0	70,8	70,3	69,9
Temperaturkoeffizient	+0,60	+0,43	+0,36	+0,27	+0,17	+0,11	+0,06	0		−0,04	−0,12	0,10

Dem negativen Temperaturkoeffizienten entspricht eine negative Dissoziationswärme (s. o.); diese beträgt für das erste H-Atom bei 21,5° —1,530, bei 35° —1,820 Cal.; setzt man diese Werte in die Formel für die Wärmetönung der Neutralisation: $N = 13520 - (1 - d)q$, ein, so erhält man:

Temperatur	d	(1—d)q	N ber.	N beob.
21,5	0,200	1,242	15060	14980
35	0,177	—1,506	14750	—

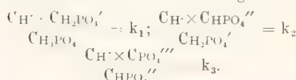
Bei der Neutralisation des 2. H-Atoms werden 12420 Cal. entbunden, bei der Neutralisation des 3. H-Atoms 6970 Cal.

Bei 160° verliert die Phosphorsäure noch kein Wasser, bei 213° geht sie fast völlig in Pyro-Säure über, bei noch höheren Temperaturen in Meta-Säure.

Phosphate. Die Phosphorsäure bildet 3 Reihen von Salzen, primäre, sekundäre, tertiäre. In Wasser löslich sind alle 3 Stufen der Alkalisalze, sowie alle primären Salze anderer Metalle. Die sekundären Salze der Erdalkalien und der Schwermetalle sind meist unlöslich, die tertiären ohne Ausnahme; durch Säuren werden sie als Hydrophosphate in Lösung gebracht.

Von mineralogisch - geologischer und technischer Bedeutung ist hauptsächlich das Tricalciumphosphat (vgl. die Abschnitte 3 und 4, sowie den Artikel „Düngemittel“); von analytischer das schwerlösliche Ammoniummagnesiumphosphat.

Für die Salzeigenschaften und die Salzbildung sind die Dissoziationsverhältnisse der H_3PO_4 maßgebend. Jede Phosphatlösung enthält die Anionen H_2PO_4', HPO_4'', PO_4'''; ihr Verhältnis ist bestimmt durch die Dissoziationsgleichungen:



$$\frac{C_{H^\cdot} \cdot C_{H_2PO_4'}}{C_{H_3PO_4}} = k_1; \quad \frac{C_{H^\cdot} \times C_{HPO_4''}}{C_{H_2PO_4'}} = k_2$$
$$\frac{C_{H^\cdot} \times C_{PO_4'''}}{C_{HPO_4''}} = k_3.$$

Die Salzausscheidung ist von dem Löslichkeitsprodukt abhängig; das schwächste Anion PO_3''' wird mit den schwächsten Kationen die am wenigsten löslichen Salze bilden; durch Säurezusatz wird die Konzentration des PO_4'''-Ions vermindert und die Bildung von Tri-Phosphaten erschwert.

Die Dissoziationsverhältnisse ergeben sich auch aus der Reaktion der verschiedenen Salze, die tertiären und auch noch die sekundären reagieren alkalisch, erst die primären sauer (vgl. S. 568).

Mit schwachen Kationen bilden sich Salze, die in erheblichem Maße der Hydrolyse unterliegen (s. S. 567).

Die Tabelle gibt die Leitfähigkeit (μ) und Dissoziation für Mono- und Di-Natriumphosphat:

$Na_2H_2PO_4$	g-Mol. im Liter	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,002	0,001	0,000
	μ	99,23	115,57	130,25	147,39	158,5	168,3	177,4	181,6	194
	% ionisiert	51,2	59,6	67,4	76,0	81,7	86,7	91,5	(94,1)	–
NaH_2PO_4	μ (korrigiert)	49,41	53,95	57,55	60,28	63,68	65,21	—	66,22	70,0
	μ (beobachtet)	49,74	54,43	58,26	61,43(?)	65,53	67,58	—	71,68(?)	—
	% ionisiert	70 6	77,1	82,2	(87,6)	91,2	93,2	—	(96,7)	—

Die ( )-Werte sind graphisch extra- oder intrapoliert; die Korrekturen beziehen sich beim Di-Natriumsalz auf Hydrolyse (sehr gering: 0,547% für die Konzentration 0,001), beim Mono-Salz auf die H·-Dissoziation; die Grenzleitfähigkeiten ergeben sich aus den Werten der Anionen (s. oben) und denen der Kationen (für Na· ist 43,6, für H· 315,0 zu setzen).

Die 3 Stufen können in verschiedener Weise unterschieden werden. Beim Erhitzen bleiben die tertiären Phosphate unverändert, die sekundären gehen in Pyrophosphate, die primären in Metaphosphate über; beim Betupfen des Glührückstandes mit Silbernitrat geben die unveränderten Orthophosphate einen gelben Fleck, die Pyro- und Metaphosphate weiße Flecken;

die Metaphosphate werden auch daran erkannt, daß die Lösung Eiweiß koaguliert. Lösliche Salze von basischer Reaktion sind sekundär oder tertiär; sekundäre und tertiäre Salze werden durch Behandlung mit $CaCl_2$ und NH_3 unterschieden: Sekundäres Ca-Phosphat geht beim Erwärmen mit NH_3-Lösung in tertiäres über und gibt Phosphorsäure an die Lösung ab, während über tertiärem die Lösung von Phosphorsäure frei ist.

Ester. Phosphorsäure bildet 3 Reihen von Estern. Die tertiären entstehen aus Silberphosphat und Jodalkyl, die primären und sekundären durch Einwirkung von Alkohol auf Phosphorsäuresirup oder Phosphorsäureanhydrid. Die tertiären Ester sind neutrale wasserunlösliche Flüssigkeiten, die sekundären sind 1-basische, die primären 2-basische Säuren; sie sind stärker als Phosphorsäure. Die Salze sind fast alle wasserlöslich.

Komplexverbindungen. Die Phosphorsäure bildet mit einer Reihe von Oxyden, namentlich Molybdän-, Wolfram- und Vanadiumoxyd komplexe Verbindungen: Phosphormolybdänsäure $2H_3PO_4 . 20MO_3 . 21H_2O$ (oder 38 oder 41); In den Salzen kann das Verhältnis $P_2O_5 : MO_3$ verschiedene Werte besitzen: 1:24, 1:22, 1:20, 1:15 bis 18, 1:5. — Ebenso bei Wolframoxyd.

Das Ammonphosphormolybdat besitzt für die analytische Chemie Bedeutung.

ζ) Pyrophosphorsäure $H_4P_2O_7$. Durch Erhitzen von H_3PO_4 auf 213° entsteht unter Wasserabgabe die Pyrosäure, nebenher immer auch etwas Metasäure; man erkennt die Veränderung schon daran, daß die neutralisierte Lösung mit $AgNO_3$ keinen gelben Niederschlag mehr gibt, sondern einen weißen. Bei dem umgekehrten Vorgang, der Hydratation des P_2O_5, soll nach den meisten Autoren Pyrosäure in nachweisbarer Menge nicht entstehen, Holt und Myers wollen aber Pyrosäure durch fraktionierte Fällung mit $AgNO_3$ festgestellt haben.

Die reine Säure ist eine farblose glasige Masse. Kristalle sind sehr schwierig zu erhalten; man muß die sirupöse Masse etwa 3 Monate lang bei —10° neben P_2O_5 stehen lassen. Der Schmelzpunkt liegt über 61°, die Schmelzwärme beträgt —2,12 Cal.

In Lösung geht die Pyrosäure allmählich in die Orthosäure über; die Umwandlungswärme beträgt 12,35 Cal. (fest). Die Umwandlungsgeschwindigkeit ist proportional der Konzentration der Pyrosäure, sie wächst mit steigender H-Ionenkonzentration, aber nicht proportional, und ebenso mit steigender Temperatur nach der „R-G-T-Regel" (eine Steigerung um 10° bringt die Geschwindigkeit auf das 2,57-fache): beim Kochen mit etwas HNO_3 ist die Umwandlung rasch beendet.

Der Zustand der gelösten Säure ist verschieden je nach der Darstellungsweise: durch Dehydratation der Orthosäure hergestellte Pyrosäure ergibt eine Gefrierpunktserniedrigung, die auf die 4- bis 5-fache Molekulargröße schließen läßt; dagegen werden durch Zersetzung des Pb-Salzes einfache Molekeln erhalten.

Ueber die Dissoziations- und Leitfähigkeitsverhältnisse der Pyro-Säure wurden schon oben verschiedene Angaben gemacht; die Tabelle (Abbott und Bray) gibt eine ins einzelne gehende Auskunft über den Zustand der Lösung (die interessante Ableitung muß im Original nachgesehen werden):

Konzentration (mg-Mol im Liter)	50	25	12,5	5,0	2,5	1,25
μ beobachtet	353,8	384,9	438,6	503,3	556,7	602,0
1. Dissoziation in %	86,6	87,0	90,0	92,0	94,0	96,0
Totale Ionenkonzentration (in Aequivalenten)	51,7	27,9	15,77	7,18	3,95	2,13
$H_4P_2O_7$	7,0	3,25	1,25	0,40	0,15	0,05
$H_3P_2O_7$	34,3	15,6	6,73	2,02	0,75	0,27
$H_2P_2O_7$	8,7	6,15	4,52	2,58	1,60	0,93
K_2	0,0132	0,0110	0,0106	0,0095	0,0084	0,0073
K_1	0,253	0,134	0,085	0,036	0,020	0,011

Die Pyrosäure ist vierbasisch; es kommen aber hauptsächlich die Salze $Me^I_4P_2O_7$ und $Me^I_2H_2P_2O_7$ in Betracht, von denen die ersten aus den sekundären Orthophosphaten beim Erhitzen entstehen (das Na-Salz bei 240°). Die Anhydroalkalisalze und die meisten Dihydrosalze sind in Wasser löslich, die Anhydrosalze der anderen Metalle sind unlöslich.

Die Lösungen der Neutralsalze sind ziemlich beständig; erst beim Erhitzen mit Wasser auf 280° gehen sie in sekundäre Orthophosphate über. Beim Schmelzen mit Alkalien geben sie Orthophosphate, die sauren gehen beim Glühen in Metaphosphate über.

η) Metaphosphorsäure HPO_3. Die Säure wurde 1833 von Graham entdeckt. Man erhält sie durch Erhitzen von Phosphorsäure in einem Goldtiegel (Platin wird angegriffen); das Endprodukt unterscheidet sich von der zunächst entstehenden Pyrosäure durch die Eigenschaft Eiweißlösung, die mit etwas Essigsäure angesäuert ist, zu koagulieren. Außer Wasser geht beim Erhitzen auch etwas Phosphorsäure weg; der

Wassergehalt kann unter den der Metasäure sinken, man hat dann wohl Gemische von Metasäure und Anhydrid; je nach dem Wassergehalt bildet sie ein hartes Glas oder eine sirupöse Masse. — Auch aus P_2O_5 entsteht sie, wenn man dieses an feuchter Luft zerfließen läßt oder in wenig kaltem Wasser löst. Beim Auflösen in überschüssigem Wasser bei Zimmertemperatur entstehen nach Prideaux 75 % Metasäure, der Rest ist hauptsächlich Orthosäure, Pyrosäure soll nach den meisten Autoren nicht entstehen (vgl. S. 570). Die Lösung enthält einfache und komplexe Molekeln; die einfachen Molekeln verschwinden durch Hydratation und werden aus den komplexen nachgebildet; der Gefrierpunktserniedrigung einer ziemlich frischen Lösung entspricht eine Molekulargröße zwischen $(HPO_3)_2$ und $(HPO_3)_3$. Auch die durch Dehydratation der H_3PO_4 erhaltene Säure enthält komplexe Molekeln, die aus dem Bleisalz gewonnene dagegen einfache (vgl. die Pyrosäure). — Endlich ist noch die Bildung aus PO_3H_3 und Brom im zugeschmolzenen Rohr zu erwähnen: $H_3PO + 2Br = HPO_3 + 2HBr$.

In wässeriger Lösung erfolgt Uebergang in Orthosäure; der Uebergang wird durch höhere Temperatur und H-Ionen beschleunigt und ist von der Konzentration abhängig; eine Reaktionsordnung läßt sich nicht aufstellen und es ist dies begreiflich, da sich aus allem ein sehr komplizierter Vorgang ergibt.

Die Lösungswärme beträgt + 9,76 Cal. Die elektrische Leitfähigkeit ist beträchtlich größer als die der H_3PO_4. Bei sehr hohen Temperaturen ist die Metasäure flüchtig, der Dampf ist polymerisiert $(HPO_3)_2$.

Metaphosphate. Von großem Interesse sind die Salze der Metaphosphorsäure, die Metaphosphate: als Graham NaH_2PO_4 erhitzte, fand er, daß drei verschiedene Salze von gleicher Zusammensetzung $NaPO_3$ entstanden; damit war eine der ausgedehntesten und merkwürdigsten Isomerien der anorganischen Chemie aufgedeckt, neben einer langen Reihe von Polymeren stehen Fälle von eigentlicher Isomerie (Metamerie). Die Isomerie der Metaphosphate wurde vom chemischen Standpunkt aus von Fleitmann und Henneberg bearbeitet, die physikalisch-chemische Aufklärung erfolgte hauptsächlich durch Tammann, dessen Resultate dann später von anderen zum Teil zweifelhaft gemacht wurden; eine endgültige Feststellung ist noch nicht erfolgt. Im folgenden soll im wesentlichen die Methode Tammanns an einigen Beispielen gezeigt werden, Vollständigkeit ist nicht beabsichtigt.

Die Feststellung der Isomerie (Polymerie oder Metamerie) war bei den anorganischen Verbindungen vor der Aufdeckung der osmotischen Gesetzmäßigkeiten (Theorie der Lösungen) mit Schwierigkeiten verbunden, da diese Stoffe meist nicht vergasbar sind. Man war auf eine in vielen Fällen zweifelhafte chemische Beweisführung angewiesen. Eine völlige Aufklärung der Isomerieverhältnisse in der anorganischen Chemie wird allerdings erst möglich sein, wenn die Theorie der Lösungen auch auf den festen Zustand ausgedehnt sein wird, doch sind mit den auf der Siedepunktserhöhung, der Gefrierpunktserniedrigung und der elektrischen Leitfähigkeit beruhenden Methoden auch jetzt schon schöne Resultate erzielt worden; eines der bekanntesten Beispiele sind eben die Metaphosphate.

Die grundlegende Arbeit von Fleitmann und Henneberg benutze als Beweismittel die Doppelsalze und den Kristallwassergehalt, indem Formeln aufgesucht wurden, welche in möglichst einfacher Weise das Metallverhältnis der Doppelsalze erklären, z. B. $KNa(PO_3)_2$, und welche Bruchteile von Wassermolekeln vermeiden, z. B. $Ag_3(PO_3)_3 . H_2O$.

Für die Metamerie ergibt diese Methode gute Resultate (s. u.), in Polymeriefällen aber folgt aus der Zusammensetzung der Doppelsalze für die Komplexität des Anions nichts, es muß erst nachgewiesen werden, daß die Metallatome nach verschiedenen Seiten wandern, oder daß die Leitfähigkeit des Doppelsalzes sich nicht additiv aus den Werten für die Komponenten zusammensetzt.

Beides ist z. B. für das Salz $KNa(PO_3)_2$ nicht der Fall: ob die Darstellung aus KCl und $Na_2(PO_3)_2$ oder aus NaCl und $K_2(PO_3)_2$ geschieht, beidemal ergibt sich dieselbe Leitfähigkeit, die mit der Summe der Einzelleitfähigkeiten übereinstimmt. — Die Doppelsalze sind Molekularverbindungen: $Na_2(PO_3)_2 . K_2(PO_3)_2$.

Es wird zunächst die Tammannsche Methode an den Fleitmannschen Di- und Trimetaphosphaten demonstriert:

Dimetaphosphate. Darstellung des K-, Na-, NH_4-Salzes durch Umsetzung der Alkalisulfide mit Cu-Dimetaphosphat.

Trimetaphosphate. Natriumtrimetaphosphat aus $Na(NH_4)_2PO_4$ durch Erhitzen bis der Rückstand fest neutral reagiert.

Nachdem festgestellt war, daß das Gesetz von Kohlrausch (Additivität der Leitfähigkeit; s. den Artikel „Dissoziation. Elektrolytische Dissoziation") bei diesen Metaphosphaten erfüllt ist, daß also alle Metallatome Ionen sind, wurde zum Nachweis der Konstitution der Aktivitätsfaktor i einmal aus der Gefrierpunktserniedrigung, das andere Mal aus der Leitfähigkeit hergeleitet:

$$i_f = \frac{(t_0 - t) \times M}{18,9}$$

$$i_\lambda = 1 + (\varkappa - 1)\alpha$$

$t_0 - t$		Gefrierpunktserniedrigung
M	=	Molekulargewicht
18,9	=	molare Erniedrigung
$\varkappa$	=	Zahl der Ionen
α	=	Dissoziationsgrad

Es wurde ein Wert von M aufgesucht, der mit entsprechendem $\varkappa$ in beiden Formeln denselben Wert für i ergibt.

g-Aequivalente im Liter	c	i_r	i_λ	i_r/i_λ
Dimetaphosphat		$3Na(PO_3)_3$		
0,6	0,361	2,29	2,08	1,10
0,1	0,532	2,77	2,60	1,06
0,025	0,679	3,05	3,04	1,00
Trimetaphosphat		$2Na(PO_3)_2$		
0,3	0,536	2,03	2,07	0,98
0,075	0,681	2,17	2,36	0,92
0,0187	0,791	2,48	2,58	0,96

Die Formeln müssen demnach vertauscht werden.

Demgegenüber kamen Warschauer und Wiesler nach einer anderen Methode zu anderen Resultaten. Sie bestimmten die Komplexität des Anions nach der Ostwald-Waldenschen Formel

$$n_a = \frac{\lambda_{1024} - \lambda_{32}}{10 \cdot n_k}$$

n_a = Wertigkeit des Anions
n_k = Wertigkeit des Kations = 1
λ_{1024} λ_{32} Leitfähigkeiten bei den angegebenen Verdünnungen

	$Na_4[(PO_3)_4] \cdot 4\,aq$	$Li_4[(PO_3)_4] \cdot 4\,aq$	$(NH_4)_4[(PO_3)_4]$	$K_4[(PO_3)_4] \cdot 2\,aq$	$K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3\,aq$
$A_{1024}-A_{32}$	40,6	41,6	42,7	43,9	44,1
n_a	4,06	4,16	4,27	4,39	4,41

Zum Vergleich sind die Werte für Ferrocyankalium hinzugefügt. Die Fleitmannschen Di- und die Tammannschen Trimetaphosphate wären demnach Tetrametaphosphate, dagegen würden die Fleitmannschen Trimetaphosphate zu Recht bestehen, da Wiesler nach derselben Methode für n_a die Werte 2,8 und 3,6 findet.

Es sollen noch einige Metameriefälle behandelt werden. Solche ergeben sich z. B. bei der Darstellung des Grahamschen Salzes (s. oben), in das alle Natriummetaphosphate beim Schmelzen übergehen. Die Produkte sind aber nicht gleichartig, die Lösungen der glasartigen Schmelzen zeigen Unterschiede bis zu 20% in der Leitfähigkeit.

Das Grahamsche Salz ist als ein Gemisch aus einem Hexametaphosphat $Na_6(PO_3)_6$ und zwei anderen Metaphosphaten, wahrscheinlich $Na_5[Na(PO_3)_6]$ und $Na_4[Na_2(PO_3)_6]$ anzusehen. Das Vorhandensein eines Salzes $Na_5[Na(PO_3)_6]$ wird durch das Ammonsalz $(NH_4)_5Na(PO_3)_6$ bewiesen, in welchem Na nicht durch NH_4 ersetzt werden kann (chemische Methode; s. o.).

Gießt man eine Lösung des Grahamschen Salzes in überschüssiges $AgNO_3$, so erhält man ein kristallines Ag-Salz und eine terpentinartige Flüssigkeit, die aus einem Gemenge der Salze $Ag_4[Na_2(PO_3)_6]$ und $Ag_5[Na(PO_3)_6]$ besteht. Aus dem kristallinen Ag-Salz läßt sich ein Na-Salz herstellen, das folgende Werte gibt (vgl. oben).

Aequivalente $NaPO_3$ im Liter	$Na_3[Na_3(PO_3)_6]$ i_r	i_λ	i_r/i_λ	
0,6	1,92	2,02	0,95	M = 612
0,3	2,11	2,23	0,95	κ 4
0,15	2,18	2,36	0,92	
0,075	2,24	2,46	0,91	

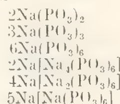
Das Salz kann in 7 Ionen zerfallen 6Na und $[(PO_3)_6]$, bei den angegebenen Verdünnungen scheint aber nur Zerfall in 4 Ionen stattzufinden.

Die Leitfähigkeiten dieses Salzes, des Grahamschen und des aus Metaphosphorsäure hergestellten sind (t = 18°8; v = Verdünnung in Litern):

	aus Metaphosphorsäure	Grahams Salz	$Na_3[Na_3(PO_3)]$
v	$\lambda \cdot 10^8$	$\lambda \cdot 10^8$	$\lambda \cdot 10^8$
1,66	210	180	190
3,33	240	198	210
6,66	269	212	231
13,33	301	230	253

Schließlich entsteht noch durch Lösen von PbO in H_3PO_4 Eindampfen, Schmelzen und Umsetzen mit Na_2S ein Salz $Na_2[Na_4(PO_3)_6]$; — durch Eintragen von PbO in geschmolzene Metasäure entsteht Pyrophosphat. Aus Leitfähigkeitsmessungen schließt Tammann, daß nur zwei Metallatome als Ionen abgespalten sein können (die Summe der Ionengeschwindigkeiten darf nicht größer sein als λ_∞). Bei der angegebenen Formel stimmen aber die Werte i_r und i_λ nicht überein, was auch nicht zu erwarten ist, da die Lösungen ausgesprochen kolloidalen Charakter haben und die Methode auf solche nicht anwendbar ist; dies ist bei diesen Untersuchungen stets zu beachten.

Es ergibt sich die Reihe:



$2Na(PO_3)_2$
$3Na(PO_3)_3$
$6Na(PO_3)_6$
$2Na[Na_4(PO_3)_6]$
$4Na[Na_2(PO_3)_6]$
$5Na[Na(PO_3)_6]$

Dazu 3 unlösliche sehr hochmolekulare Metaphosphate; z. B. das dem Silbersalz $(NaPO_3)_{24}(AgPO_3)$ entsprechende.

Tammann schließt mit den Worten: „Die Reihe der Metaphosphate ist nicht viel ärmer als die des Aethylens. Wie in dieser sowohl Polymerie als auch Metamerie vorkommt, so findet man auch unter den Metaphosphaten beide Arten der Isomerie. Dort wurden zur Erklärung der Metamerie die Struktur- und Stereochemie erfunden. Hier genügen zum Verständnis der Isomerie die Gesetze der Elektrolyse".

8f) Halogenderivate der Phosphorsäuren. — Phosphoroxychlorid $POCl_3$. $POCl_3$ entsteht aus PCl_5 und wenig Wasser — zum erstenmal wurde es in einer schlecht verschlossenen Flasche mit PCl_5 (feuchte Luft!) von Würtz beobachtet. In ähnlicher Weise entsteht es durch Umsetzung von kristallwasserhaltigen Verbindungen (Oxalsäure) mit PCl_5. Interessant ist die Bildung nach: $Ca_3(PO_4)_2 + 6CO + 12Cl = 2POCl_3 + 3CaCl_2 + 6CO_2$; die Reaktion beginnt bei 180°, die besten Temperaturen sind 330 bis 340°. Die Darstellung im großen geschieht durch Oxydation von PCl_3 mit Kaliumchlorat. $POCl_3$ ist eine farblose, stark lichtbrechende Flüssigkeit, $d_0^{15} = 1{,}6863$; die Dämpfe riechen eigentümlich und reizen die Schleimhäute. Der Temperaturkoeffizient der molaren Oberflächenenergie beträgt 2,124, ist

also normal, wenn man mit der einfachen Molekulargröße rechnet; diese ist auch in Lösung und für den Dampf anzunehmen. Der Erstarrungspunkt liegt bei —1,5°, doch kann man bis —10° abkühlen, ohne daß die Flüssigkeit von selbst erstarrt (animpfen); der feste Stoff bildet lange, nadelförmige oder blättrige Kristalle. Der Siedepunkt liegt bei 107,2°; die Dampfdichte entspricht bei mittleren Temperaturen der einfachen Molekulargröße; bei 275° hat schon der Zerfall begonnen, die Dampfdichte ist geringer; die kritische Temperatur liegt bei 329,5° (aus der Oberflächenenergie berechnet).

Das Oxychlorid hat die Dielektrizitätskonstante 13,9 und vermag Salze zu ionisieren. Es findet Verwendung als kryoskopisches Lösungsmittel.

Wasser zersetzt unter Bildung von H_3PO_4 und HCl; organische OH-haltige Körper werden chloriert; Ag und Hg entziehen den Sauerstoff, Mg und Zn das Chlor.

Additionsverbindungen mit Metallchloriden ($SnCl_4$, $AlCl_3$, BCl_3, $MgCl_2$).

Pyrophosphorylchlorid, $P_2O_3Cl_4$. — Das $P_2O_3Cl_4$ entsteht durch eine eigentümliche Reaktion: durch die Umsetzung von PCl_3 (gekühlt) mit N_2O_3 oder N_2O_4; zugleich entstehen P_2O_5, $POCl_3$, NOCl, NO, N_2. Auch durch Einwirkung von Wasser auf $POCl_3$ soll es als Zwischenprodukt entstehen.

$P_2O_3Cl_4$ ist eine farblose, an der Luft rauchende Flüssigkeit vom spez. Gewicht (7°) 1,58; bei —50° ist es noch flüssig, es siedet bei 210° bis 215° unter teilweisem Zerfall in $POCl_3$ und P_2O_5, bei vermindertem Druck (10 mm) ergibt sich ein Gemisch von $POCl_3$ und PO_2Cl ($P_2O_3Cl_4 = POCl_3 + PO_2Cl$).

Mit Wasser findet heftige Umsetzung statt (H_3PO_4 und HCl), organische Substanzen werden verkohlt.

Metaphosphorylchlorid PO_2Cl. — PO_2Cl entsteht außer nach der eben erwähnten Reaktion durch Umsetzung von $POCl_3$ mit P_2O_5 bei 200°: $POCl_3 + P_2O_5 = 3PO_2Cl$. — Dickflüssige Masse.

Phosphorigsäurechlorid POCl. — $POCl_2$ soll aus PCl_3 und Wasser als Zwischenprodukt entstehen.

Analoge Verbindungen mit Brom.

Phosphoroxyfluorid $POFl_3$. — $POFl_3$ entsteht aus einem Gemisch von PFl_3 und Sauerstoff beim Erwärmen (Platinschwamm katalysiert die Oxydation); es bildet sich auch aus P_2O_5 durch Umsetzung mit Kryolith oder HFl (Flußsäure kann mit P_2O_5 nicht getrocknet werden!); die bequemste Darstellungsmethode ist die Reaktion zwischen $POCl_3$ und wasserfreiem $ZnFl_2$: die Entwickelung beginnt schon in der Kälte und wird durch Erwärmen beschleunigt, 50° dürfen nicht überschritten werden.

$POFl_3$ ist ein farbloses Gas; es verflüssigt sich unter Atmosphärendruck bei —40°, unter 15 Atm. bei 16°; durch plötzliche Entspannung erhält man es als eine feste weiße Masse vom Fp. —68°. Die Gasdichte entspricht der Formel POF_3 (3,69 statt 3,63).

8g) Stickstoffderivate. — Amide der Phosphorsäuren. Von der Phosphorsäure leiten sich formal 3 Amide ab, das Monamid, $NH_2.PO.(OH)_2$, das Diamid $(NH_2)_2PO.OH$ und das Triamid $(NH_2)_3.PO$; die Konstitution des letzten ist unbekannt und wohl sehr komplex (s. u.).

Die Darstellung der Amide gelingt nicht auf dem gewöhnlichen Wege, durch Umsetzung der Chloride ($POCl_3$ und PCl_5) mit Ammoniak; wohl entstehen bei dieser Reaktion phosphor- und stickstoffhaltige Körper, aber nicht die Amide der Phosphorsäure, sondern eine Reihe anderer zum Teil sehr komplizierter Verbindungen (s. u.).

Die Amide, d. h. nur das Mono- und das Diamid, können aber auf einem Umweg erhalten werden, indem man die Chloride zum Teil verestert: Mit den Verbindungen $PO.(OC_6H_5)_2Cl$ und $PO.(OC_6H_5)Cl_2$ erfolgt der Umsatz mit NH_3 in der erwarteten Weise; die Ester werden dann verseift.

Monamidophosphorsäure $H_2PO_3.NH_2$. — Entsteht durch Verseifung von $PO.(OC_6H_5)_2.NH_2$; sie kristallisiert in Tafeln; in Wasser ist sie leicht löslich, durch Alkohol wird sie gefällt, sie schmeckt süßlich; beim Stehen geht sie allmählich in Ammoniumphosphat über, beim Kochen schnell.

Diamidophosphorsäure $HPO_2(NH_2)_2$. —Entsteht durch Verseifung von $PO(OC_6H_5)(NH_2)_2$. — Kristallisierte Substanz; in trokkenem Zustand ist sie beständig, durch Säuren wird sie leicht zerlegt, nicht durch Alkalien. — Die Diamidophosphorsäure tritt in tautomeren Formen auf: so kennt man zwei Silbersalze. Durch Addition von Basen entstehen Salze, die von der Säure $(NH_2)_2P(OH)_3$ abgeleitet werden können. Man kennt Silbersalze mit 3,4 und 5 Atomen Ag: das Salz $P(OAg)_3(NHAg)_2$ explodiert heftig beim Reiben, Erhitzen und Zusammenbringen mit konzentrierter H_2SO_4.

Ehe die Abkömmlinge der Phosphorsäureamide behandelt werden können, ist es nötig, den Phosphorstickstoff und die Chlorphosphorstickstoffe zu besprechen, da die Darstellung über die Chlorphosphorstickstoffe führt.

Phosphorstickstoff P_3N_5. — Die Darstellung einer einheitlichen, wohl definierten Phosphorstickstoffverbindung ist erst sehr spät gelungen, obwohl schon Davy, Rose, Liebig und Wöhler sich mit dieser Aufgabe beschäftigten. Die Reaktion, mit der diese das gewünschte Produkt zu erhalten suchten, ist die Einwirkung von NH_3 auf PCl_5; hierbei entstehen aber ganz andere Produkte (s. u.). Schließlich erhielt Stock die Verbindung P_3N_5, indem er die Produkte,

die bei der Einwirkung von NH_3 auf P_2S_5 entstehen (vgl. S. 578), auf helle Rotglut erhitzte.

P_3N_5 ist eine weiße, geruch- und geschmacklose Substanz, die in allen Lösungsmitteln unlöslich ist. Beim Erhitzen im Vakuum zerfällt sie in die Elemente, im H_2-Strom in P und NH_3; beim Kochen mit Wasser entsteht spurenweise H_3PO_4 und NH_3, beim Erhitzen im geschlossenen Rohr auf 180° erfolgt dagegen rasche Zersetzung. P_3N_5 entzündet sich in Chlor, aber erst bei 600°, in Sauerstoff bei noch höherer Temperatur.

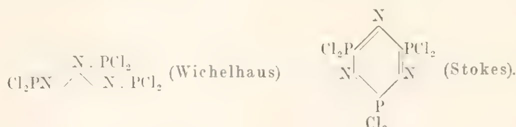
Die Einwirkung von NH_3 auf PCl_5, durch die man P_3N_5 zu erhalten hoffte, führt teils zu hochmolekularen Körpern unbekannter Konstitution (S. 575) teils zu den Chlorphosphorstickstoffen, aus denen weiterhin die Metaphosphimsäuren und die Imidophosphorsäuren entstehen.

Chlorphosphorstickstoffe. Durch Einleiten von NH_3 in PCl_5 und Erhitzen des Reaktionsproduktes erhielten Liebig und Wöhler eine Verbindung von der Zusammensetzung $PNCl_2$; heute erhitzt man PCl_5 mit NH_4Cl im geschlossenen Rohr auf 150 bis 200°. Das Reaktionsprodukt ist kein einheitlicher Stoff, sondern besteht aus einer Reihe von Körpern, die sich in 2 Gruppen ordnen lassen. Die Hauptgruppe enthält Polymerisationsprodukte des einfachen (nicht bekannten) $PNCl_2$, besonders $(PNCl_2)_3$ und $(PNCl_2)_4$. Von der anderen Gruppe kennt man nur die Verbindung $P_6N_7Cl_9$. Die Trennung der verschiedenen Bestandteile gelingt durch fraktionierte Destillation. Bei 200° und einem Druck von 13 bis 15 mm geht ein Gemisch von $(PNCl_2)_3$ und $(PNCl_2)_4$ über. Durch Erhitzen dieser Verbindungen auf 250 bis 300° tritt weitere Polymerisation ein; man erhält so Penta-Hexa-Heptaphosphonitrilchlorid; die Formeln sind durch Molekulargewichtsbestimmung festgestellt.

Formel	Fp.	Kp. (13 mm)	
$(PNCl_2)_3$	114°	127°	
$(PNCl_2)_4$	123,5°	128°	leicht
$(PNCl_2)_5$	40,5—41°	223—224	löslich
$(PNCl_2)_6$	91°	261—263	in Aether
$(PNCl_2)_7$	—18°	289—294	

Gegen kochendes Wasser, Säuren und Alkalien sind die Verbindungen beständig; schüttelt man aber die ätherische Lösung mit Wasser, so erfolgt Verseifung zu Phosphimsäuren (s. u.).

Für die Konstitutionsformeln liegen verschiedene Vorschläge vor; z. B. für $[PNCl_2]_3$:



Der Chlorphosphorstickstoff $P_6N_7Cl_9$ gehört einer anderen Reihe an. Er kristallisiert in rhombischen Prismen, schmilzt bei 237,5° und siedet bei 251 bis 263° unter 13 mm Druck. Bei höheren Temperaturen polymerisiert es sich ebenfalls. Er ist löslich im CS_2 und Benzol (in heißem weniger als in kaltem).

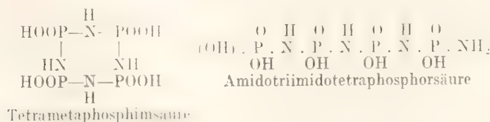
Bromphosphorstickstoff $(PNBr_2)_3$. Bildet sich analog der Chlorverbindung. Rhombische Kristalle, die bei 180° bis 190° schmelzen und in Wasser unlöslich sind.

Metaphosphimsäuren. Aus den ätherischen Lösungen der Chlorphosphorstickstoffe erhält man beim Schütteln mit Wasser, wie schon erwähnt, oder besser mit essigsaurem Natron oder (bei den höheren Polymeren) mit Natronlauge, die Metaphosphimsäuren (oder deren Na-Salze): $[PN(OH)_2]_x$.

Die einzelnen Glieder der Reihe unterscheiden sich nur wenig in ihrem Verhalten; sie sind sehr beständig, beim Kochen mit Alkalien entwickeln sie kein Ammoniak.

Nur die Chlorphosphorstickstoffe mit 3, 4, 5 und 6 $PNCl_2$-Gruppen geben Metaphosphimsäuren, die höheren geben Säuren mit einem Molekül Wasser mehr ($P_7N_7O_{15}H_{16}$).

Durch Behandlung mit Alkalien entstehen Salze der Amido imidophosphorsäuren. Stokes faßt die Phosphimsäuren als Laktame dieser Säuren auf:



Die Tetrasäure geht am schwersten in die offene Kette über (Baeyersche Spannungstheorie).

Die Metaphosphimsäuren sind mit Ausnahme der Tetrasäure, welche kristallisiert, nur in Lösung oder als Gallerten bekannt.

Die Salze sind zum Teil gut charakterisiert.

Amide der Metaphosphimsäuren. $P_3N_3Cl_6$ gibt mit Ammoniak $P_3N_3Cl_4(NH_3)_2$ und bei der Verseifung dieser Verbindung mit NaOH entsteht dann Trimetaphosphimsäurediamid. — Auch die anderen Phosphorchlornitride reagieren heftig mit NH_3.

Imidophosphorsäuren. Die Metaphosphimsäuren (oder ihre Salze) werden beim Kochen mit Essigsäure abgebaut; als erstes Produkt beim Abbau der höheren Glieder entsteht zunächst immer Tetrasäure, welche weiter gespalten wird in Triimidotetraphosphorsäure und Diimidotriphosphorsäure; das Endprodukt ist Phosphorsäure.

Imidophosphorsäure PO.NH.OH. Sie entsteht aus P_2O_5 und NH_3. Weiße, amorphe, in Wasser und Alkohol leicht lösliche Masse. Beim Kochen mit Wasser wird NH_3 abgespalten.

Ammoniakderivate unbekannter Konstitution. Phospham $(PN_2H)_x$. Es entsteht aus PCl_5 und NH_3. Beim Erhitzen des Reaktionsproduktes entweichen HCl und NH_4Cl und es bleibt ein weißes lockeres Pulver von der Zusammensetzung PN_2H zurück. Es ist in Wasser unlöslich, schmilzt und verflüchtigt sich nicht bis zur Rotglut, oxydiert sich an der Luft langsam zu P_2O_5, und geht mit schmelzendem Alkali unter Feuererscheinung und NH_3-Entwickelung in sekundäres Phosphat über.

Phosphamid $PO.NH.NH_2$(?). Behandelt man das Einwirkungsprodukt von NH_3 auf PCl_5 mit Wasser, Säure oder Alkali, so bleibt eine weiße in Wasser unlösliche Masse zurück. Beim Erhitzen zerfällt sie in NH_3 und Phosphorylnitrid, beim Kochen mit Wasser, Alkali oder Säure in H_3PO_4 und NH_3.

Phosphorsäuretriamid $PO(NH_2)_3$(?). Entsteht aus $POCl_3$ und NH_3; weißes amorphes Pulver, sehr widerstandsfähig gegen kochendes Wasser, verdünnte Säuren und Alkalien. Konzentrierte H_2SO_4 und schmelzendes KOH führen in H_3PO_4 und NH_3 über.

Phosphorylnitrid $(PON)_x$. Entsteht aus Phosphamid und Triamid beim Erhitzen bei Luftabschluß. Weißes amorphes Pulver, das bei Rotglut schmilzt und dann zu einer schwarzen glasigen Masse erstarrt. Aeußerst beständig; Säuren und Alkalien in Lösung wirken nicht ein, nur schmelzende Alkalien zerlegen in Phosphorsäure und Ammoniak.

Fluorphosphamid $PF_3(NH_2)_2$. Entsteht aus PF_3Cl_2 und NH_3. Leichte weiße Substanz, in Wasser löslich.

8h) Schwefelverbindungen des Phosphors. Etwa ein Dutzend Phosphor-Schwefel-Verbindungen wurden im Laufe der Zeit in der Literatur beschrieben, von diesen können aber nur 3 als gesichert gelten: P_2S_5, P_4S_3, P_4S_7; wahrscheinlich besteht noch eine schwefelreichere Verbindung als P_2S_5, dagegen ist die Verbindung PS_2 (P_3S_6) zu streichen: was dafür gehalten wurde, waren Gemenge von P_4S_3 und P_2S_5. Das Gebiet der Phosphor-Schwefelverbindungen wurde hauptsächlich von Stock kritisch bearbeitet. Er findet in dem Schmelzdiagramm 3 Maxima, die den angegebenen Verbindungen entsprechen und dazwischen 2 Eutektika mit etwa 47,5 und 69% Schwefel. Das Diagramm wird erhalten ob man von den Elementen oder von beliebigen Verbindungen ausgeht, entscheidend ist nur das Schwefel-Phosphor-Verhältnis; die Temperatur muß aber über 300° gehalten werden, bei 200° tritt kein Gleichgewicht ein. Bei der Temperatur des P-Schmelzpunkts tritt noch keine Reaktion ein: aus der Depression, die Schwefel verursacht, kann seine Molekulargröße (S_8) berechnet werden. Man kann schon an der Farbe erkennen, was die Schmelze enthält: die Farbe wird um so heller, je mehr sich die Zusammensetzung von beiden Seiten der des blaßgelben P_4S_7 nähert (P_4S_3 bräunlichgelb, P_2S_5 rotbraun). Alle drei Phosphor-Schwefelverbindungen zersetzen sich beim Schmelzen (P_4S_7 und P_2S_5 stärker als P_4S_3) und zeigen daher ein abgeflachtes Maximum, außerdem erschweren schlechte Wärmeleitfähigkeit und Zähflüssigkeit der Schmelze die Feststellung der Schmelzpunkte: in allen diesen Fällen erhält man durch Beobachtung der Temperaturen des Schmelzbeginns (Sinterpunktskurve) die genaue Zusammensetzung für das Maximum. Eigentlich sollte gar keine Kurve für das Sintern existieren: theoretisch werden die zugehörigen Temperaturen durch die durch die eutektischen Punkte gelegten Abszissenparallelen angegeben; praktisch aber ergibt sich bei geringer Menge des Eutektikums, bei Annäherung an die Zusammensetzung der Verbindung, ein steiler Anstieg der Temperatur. — Nach dieser Methode wurde nachgewiesen, daß eine Verbindung PS_2 (nahe bei P_4S_7) nicht existiert. — Dieselben Resultate erhält man, wenn man ein vorgeschrittenes Stadium beobachtet: Stock macht immer dreifache Temperaturangaben: z. B. für P_4S_3: 171° bis 171,5° bis 192,5° (feucht-gesintert-geschmolzen).

Außer durch Zusammenschmelzen können die Phosphor-Schwefelverbindungen auch durch Reaktion in Lösung (CS_2) hergestellt werden; Jod katalysiert.

Dampfdichten der Phosphorsulfide.

	P_4S_3 (220)	P_4S_7 (348)	P_2S_5 (222)
600°	—		[illegible]
650°	—		[illegible]
700°	219	337	[illegible]
750°	213	323	[illegible]
800°	202	202	144

Dampfdichten der Phosphorsulfide.

	P_4S_3 (220)	P_4S_7 (348)	P_2S_5 (222)
850°	185	193	141
900°	182	179	136
950°	179	173	133
1000°	170	167	133

Die Tabelle zeigt, daß P_2S_5 schon nahe an seinem Siedepunkt (520° bis 530°) zerfällt; P_4S_3 und P_4S_7 lassen sich bei gewöhnlichem Druck in CO_2-Atmosphäre unzersetzt destillieren, P_2S_5 dissoziiert, stärker im Vakuum. — Auffallend ist die starke Zersetzung des P_4S_7 zwischen 750° und 800°.

	P_4S_3	P_4S_7	P_4S_{10}
Farbe als feste Substanz	gelb	fast weiß	gelb
Farbe als Schmelze bei 300°	bräunlich gelb	blaßgelb	rotbraun
Dichte bei 17°	2,03	2,19	2,09
Schmelzkonstanten	171 171,5—172°	305—308 310°	286—288—290°
Siedepunkt bei 760 mm	407—408°	523°	513 515°
Löslichkeit in CS_2 bei 17°	1 : 1	1 : 3500*	1 : 450
Löslichkeit in CS_2 bei 0°	1 : 3,7	1 : 20000	1 : 550
Löslichkeit in CS_2 bei —20°	1 : 9	—	1 : 1200
Löslichkeit in C_6H_6 bei 17°	1 : 40		—
Durch kaltes Wasser	kaum angegriffen	ziemlich leicht zersetzt	langsam zersetzt
Beim Aufbewahren	kaum zersetzt	beständig	deutlich zersetzt

* Hier und in anderen Eigenschaften Ausnahmestellung des P_4S_7.

Tetraphosphortrisulfid P_4S_3. — P_4S_3, das phosphorreichste der Phosphorsulfide, hat technische Bedeutung gewonnen, seitdem in den meisten Staaten die Verwendung weißen Phosphors zur Herstellung von Zündhölzern verboten ist. — Die Darstellung geschieht am besten durch Erhitzen eines Gemisches von rotem Phosphor und Schwefel. Um ein reines Produkt zu erhalten, ist es nach Stock nötig einen Ueberschuß von rotem Phosphor zu nehmen und möglichst hoch (zum kräftigen Destillieren) zu erhitzen. Jod beschleunigt, läßt sich aber nicht mehr entfernen. Man extrahiert mit CS_2 und reinigt durch Auskochen mit Wasser, gegen das P_4S_3 widerstandsfähiger ist als alle anderen Phosphorsulfide. — Hellgelbe rhombische Prismen. Außer CS_2 lösen auch PCl_3 und $PSCl_3$, Alkohol und Aether zersetzen, Alkalien bilden komplexe Verbindungen unter Entwickelung von H_2 und PH_3 (vgl. die Tabelle). Die Molekularformel ist sowohl im gasförmigen Zustand, wie in CS_2-Lösung P_4S_3.

An der Luft findet bei ca. 100° Entzündung statt. Ganz reines P_4S_3 oxydiert sich bei 40 bis 60° unter Leuchten. Die Erscheinungen und die Bedingungen des Auftretens sind denen bei der Phosphoroxydation ähnlich (maximaler Sauerstoffleuchtdruck, Verhinderung durch organische Stoffe); der Unterschied liegt nur in der Temperatur (Phosphor leuchtet schon bei Zimmertemperatur). Wie weißer Phosphor gibt auch P_4S_3 die Mitscherlichsche Reaktion (Leuchten der kondensierten Wasserdämpfe), nur etwas schwächer. Die Unterscheidung der beiden Stoffe, die wegen des Phosphorgesetzes (s. o.) wichtig ist, gelingt aber leicht nach der Methode von Schenck und Scharff (s. S. 555).

Tetraphosphorheptasulfid P_4S_7. — P_4S_7 wurde 1891 von Mai entdeckt, als er das (nicht existierende) Phosphortrisulfid durch Zusammenschmelzen von rotem Phosphor mit Schwefel im Verhältnis 2P:3S darstellen wollte. Man arbeitet immer mit einem Ueberschuß von Phosphor, da sich P_4S_3 leichter als P_2S_5 von dem Reaktionsprodukt trennen läßt (s. Tabelle). — Die Eigenschaften siehe oben in der Tabelle. Am meisten fällt die Unlöslichkeit in fast allen indifferenten Lösungsmitteln auf. Alkalien lösen schon in der Kälte glatt.

Phosphorpentasulfid P_2S_5. - P_2S_5 ist die am längsten bekannte Phosphor-Schwefel-Verbindung, sie wurde von Berzelius 1842 aus weißem P und S bei 100° (explosionsartige Reaktion) hergestellt. Bequemer erhält man sie aus rotem P und S beim Zusammenschmelzen oder in CS_2-Lösung (210°; Jod katalysiert: Reaktion schon bei 120°). Nach Stock erhitzt man die der Formel entsprechenden Mengen unter Druck auf Rotglut und kristallisiert aus CS_2 um. Mit sehr großem S-Ueberschuß scheint eine schwefelreichere Verbindung zu entstehen. Aus P_4S_3 und Schwefel in CS_2-Lösung entsteht Pentasulfid beim Belichten.

Ueber Aussehen und Eigenschaften vgl. die Tabelle oben. Die Molekulargröße in CS_2-Lösung ergibt sich nach der Gefrierpunktsmethode zu P_4S_{10}; die Dampfdichte

entspricht bei 600° etwa der Formel P_2S_5, doch läßt der Gang der Dichte mit der Temperatur unterhalb 600° größere Molekeln erwarten (s. die Tabelle). Daß P_4S_{10} schon wenig über der Siedetemperatur stark zerfallen ist, geht aus dem Verhalten der Dämpfe bei der Kondensation hervor; kühlt man langsam ab, so erhält man hauptsächlich P_4S_{10}, kühlt man rasch, so erhält man komplizierte auffallend leicht in CS_2 lösliche Gemische.

P_2S_5 verbrennt zu Pentoxyd und SO_2. setzt sich mit Wasser zu H_3PO_4 und H_2S um und löst sich in Alkalien zu Salzen der Sulfophosphorsäuren. Mit NH_3 entstehen die Verbindungen $P_2N_5 . 6NH_3$ (gelb) und $P_2S_5 . 7NH_3$ (farblos). Diese Verbindungen geben beim Erhitzen P_3N_5, mit flüssigem NH_3 entstehen Ammonsalze der Iminotrithio- und der Nitrilodithiophosphorsäure (s. u).

Phosphoroxysulfide. — Es sind mehrere Verbindungen bekannt. $P_4S_4O_6$: Entsteht beim Zusammenschmelzen von P_2O_3 mit S bei 160° in CO_2-Atmosphäre. Farblose Kristalle, die bei 102° schmelzen und bei 295° sieden. Die Dampfdichte entspricht der Formel $P_4S_4O_6$. In CS_2 ist die Substanz löslich; mit Wasser zersetzt sie sich in H_2S und H_3PO_3.—$P_2S_3O_3$: Bildet sich aus einer mit H_2S gesättigten Lösung von Phosphoroxychlorid beim Stehen bei 0°. Es existiert in 2 Modifikationen. Die eine, amorphe, geht bei 150° beim Erhitzen mit $POCl_3$ in die andere, kristalline, über; diese schmilzt bei 300°. Beim Erhitzen im Vakuum (150°) bildet sich P_2O_5; Wasser zersetzt.

Phosphorselenverbindungen. Mit Selen bildet Phosphor den Sulfiden ähnliche Verbindungen: P_2Se_3. P_2Se_5; P_4Se, P_2Se. Darstellung und Verhalten analog den Sulfiden.

Thiophosphorsäuren. Von der Phosphorsäure leiten sich formal durch völligen oder teilweisen Ersatz des Sauerstoffs durch Schwefel die Thiophosphorsäuren ab. Die freien Säuren sind aber nicht beständig, sie zerfallen in H_2S und H_3PO_4. Dagegen ist eine Reihe von Salzen und anderen Abkömmlingen bekannt. Die Salze entstehen beim Zusammenschmelzen von Phosphorsulfiden mit Metallsulfiden oder -chloriden im zugeschmolzenen Rohr (Tetrasulfophosphate; nur die der Schwermetalle sind beständig), oder durch Behandlung von P_2S_5 mit Schwefelalkalien oder Alkalilaugen (Mono-, Di-, Trithiophosphate).

Bei der Reaktion mit Alkalisulfid entsteht in der Hauptsache Dithiophosphat; Tetrathiophosphat scheint nicht zu entstehen, Trithiophosphat konnte noch nicht isoliert werden. Aus dem Gemisch fällt man entweder Sr-dithiophosphat für sich oder zunächst die Na-Salze der Di- und der Tri-Säure zusammen; beim Erwärmen auf 50 bis 55° geht das Tri-Salz unter Sulfidbildung in das Di-Salz über, durch Alkohol wird reines Dithiophosphat gefällt. Beim Erwärmen auf 90° findet allmählich Umwandlung in Monothiophosphat und schließlich in Orthophosphat unter H_2S-Entwickelung statt.

Die Salze der Mono-, Di- und Tri-Säure mit demselben Metall sind um so mehr löslich, je mehr sie Schwefel enthalten; die Alkalisalze sind leicht löslich, die der Schwermetalle schwer löslich, bei den Erdalkalisalzen entscheidet der Schwefelgehalt.

Entsprechende Salze bildet die thiophosphorige Säure, außerdem existieren Verbindungen, die in der Sauerstoffreihe keine Analoga haben: Cu_4PS_3, Ag_4PS_3.

Auch ein Ester ist bekannt $(C_2H_5)_3PS_4$; er wurde von Carius entdeckt und war die erste bekannte Verbindung der normalen Sulfophosphorsäure. — Oxydationsmittel scheiden Schwefel ab.

Derivate der Sulfophosphorsäuren. — Phosphorsulfochlorid $PSCl_3$. $PSCl_3$ wurde zuerst von Wöhler dargestellt durch Erhitzen von Phosphor mit Chlorschwefel. In der Hauptsache sind es Reaktionen des PCl_3 und PCl_5, bei denen sich das Sulfochlorid bildet: PCl_3 addiert im geschlossenen Rohr bei 130° Schwefel; mit Chlorschwefel und Thioxylchlorid entsteht bei 160° Oxychlorid und Sulfochlorid; PCl_5 setzt sich mit H_2S, CS_2, P_2S_5, Schwefelmetallen, unter Bildung von Sulfochlorid um.

$PSCl_3$ ist eine farblose, bewegliche, stark lichtbrechende Flüssigkeit von stechendem Geruch, $d^0 = 1{,}6682$. Der Siedepunkt liegt bei 125°. Die Dampfdichte beträgt 5,88 bis 5,96 (statt 5,80). Sulfochlorid löst Schwefel und Phosphor beim Erwärmen (Kristallisationsmittel), mit CS_2 ist es in allen Verhältnissen mischbar.

Beim Durchgang durch glühende Röhren findet Zerfall in Schwefel, Chlorschwefel und Phosphorchlorür statt. — Wasser zersetzt in der Kälte langsam, rascher beim Erwärmen in H_2S, HCl, H_3PO_4. Mit Alkalihydroxyd entstehen neben Chlorid Salze der Phosphorsulfosäuren. —Der Dampf verbrennt nur schwer, mit Chlor entsteht PCl_5 und Chlorschwefel. — Sauerstoffhaltige organische Verbindungen werden geschwefelt.

Phosphorsulfobromid $PSBr_3$. Entsteht durch Kochen von PBr_3 mit Schwefelblumen, besser durch Reaktion von P, S, Br in CS_2-Lösung. — Das $PSBr_3$ ist ein fester Körper, der aus PBr_3 in gelben Oktaedern kristallisiert; spez. Gew. bei 17° 2,85. Bei 38° schmilzt das $PSBr_3$ zu einer gelblichen Flüssigkeit, die sich beim Erwärmen bräunt und zersetzt, bei 175° geht PBr_3 über, bei 212 bis 215° unzersetztes $PSBr_3$ ($PSBr_3 \rightleftarrows PBr_3 + S$). — Es existiert ein Hydrat $PSBr_3 . H_2O$, eine gelbe kristalline Masse von aromatischem Geruch; Fp. 35°; $d^{18} = 2{,}7937$. Beim Schmelzen tritt Spaltung ein.

Amide der Thiophosphorsäuren.

Die Amide der Thiophosphorsäuren werden durch Umsetzung von NH_3 mit $PSCl_3$ gewonnen. Von besonderem Interesse sind die Produkte, die bei der Einwirkung von flüssigem NH_3 auf P_2S_5 entstehen: Ammoniumsalze der Iminotrithiophosphorsäure $NH:P:(SH)_3$ und der Nitrilodithiophosphorsäure $N:P:(SH)_2$. Es entstehen zunächst die Additionsprodukte $P_2S_5.6NH_3$ und $P_2S_5.7NH_3$, die dann mit weiterem NH_3 in die Verbindungen $PS_3N_4H_{13}$ und $PS_2N_3H_8$ übergehen. $P_2S_5.6NH_3$ kann aufgefaßt werden als $S[P.NH.(SNH_4)_2]_2$. Mit Wasser entsteht aus $NH:P:(SNH_4)_3$ beim vorsichtigen Erwärmen $O:P:(SNH_4)_3$, Ammonium trithiophosphat. Beim Erhitzen geben die Verbindungen NH_3 und H_2S ab und gehen in eine Reihe von zum Teil gelb gefärbten Produkten über (PSN), bei weiterem Erhitzen entweicht noch S und P und man erhält als Endprodukt Phosphorstickstoff P_3N_5 (s. o.).

9. Thermochemie. Die Wärmetönungen entsprechen der Bildung aus den Elementen (Phosphor in der gewöhnlichen Modifikation):

H_3PO_2	(fest)	139,97	Cal.
H_3PO_3	(„)	227,70	„
P_2O_5	(„)	369,6	„
H_3PO_4	(„)	305,8	„
$H_4P_2O_7$	(„)	535,7	„
HPO_3	(„)	226,6	„
PH_3	(gasförmig)	4,9	„
PH_4Br	(fest)	40,3	„
$P_{12}H_6$	(„)	53,4	„
PCl_3	(flüssig)	76,6	„
PCl_5	(fest)	109,2	„
$POCl_3$	(flüssig)	143,9	„
PBr_3	(„)	44,8	„
PBr_5	(fest)	59,0	„
PJ_3	(„)	10,9	„

10. Photochemie. Das Vakuumrohrspektrum hat einige stärkere Linien bei 6049, 6039, 6029, 4606, 4592, 4594, 4226, 4182, 3721, 3709 A.-E. — Ueber Umwandlungen des Phosphors durch Licht usw. siehe Abschnitt 6.

11. Kolloidchemie. Von The Svedberg wurde durch elektrische Zerstäubung ein im durchfallenden Licht gelbliches im auffallenden fleischrotes Isobutylalkosol dargestellt. Ein Phosphorsol entsteht auch, wenn man weißen P mit PBr_3 im zugeschmolzenen Rohr auf 150° erhitzt. Die Lösung wird gelb durchsichtig und setzt dann ein hellrotes Gelb ab. Von den Verbindungen bilden die Metaphosphate zum Teil kolloidale Lösungen.

Literatur. *Siehe beim Antimon. Das Historische hauptsächlich nach* ***H. Peters****, Chemiker-Zeitung 1902.*

A. Stirm.

β) Arsen.

As. Atomgewicht 75,00.

1. Atomgewicht. 2. Geschichte. 3. Vorkommen. 4. Darstellung. 5. Allgemeine Charakteristik des Elements (Valenz, Elektrochemie). 6. Formarten und allotrope Modifikationen. 7. Analytisches. 8. Spezielle Chemie. 9. Thermochemie. 10. Photochemie. 11. Kolloidchemie.

1. Atomgewicht. Als Atomgewicht des As ist nach den letzten Festsetzungen der Atomgewichtskommission (1913) **75,00** anzunehmen. — Dieses Atomgewicht ist in Uebereinstimmung mit dem Gesetz von Avogadro mit der Regel von Dulong und Petit, mit der Lehre vom Isomorphismus und endlich mit dem periodischen Gesetz: alle Eigenschaften des Arsens sind so, wie sie sich für ein Element vom Atomgewicht 75 erwarten lassen.

2. Geschichte. Im Altertum waren wohl nur die Schwefelverbindungen des Arsens bekannt (*σανδαράχη*, *ἀρσενικόν*); in einer dem Zosimus zugeschriebenen Schrift wird allerdings auch die Darstellung von metallischem Arsen erwähnt. Genaue Angaben darüber finden sich bei Albertus Magnus. Die Alchemisten bezeichneten Arsen wegen seiner Metallähnlichkeit als „Bastard der Metalle". Arsenik findet sich zuerst bei dem persischen Arzt Abu Mansur (10. Jahrhundert) erwähnt und dann bei Pseudo-Geber; er wurde durch Rösten von Realgar erhalten und als weißer Arsenik von dem roten und gelben (Realgar und Auripigment) unterschieden; im Hüttenrauch wurde er gegen Ende des Mittelalters entdeckt. Die Eigenschaft Kupfer weiß zu färben, ließ das Arsen bei den Alchemisten eine große Rolle spielen, es hatte in dieser Fähigkeit seinen Platz neben dem Quecksilber und wurde deshalb früher auch als „mercurius" bezeichnet; Pseudo-Geber nennt den Arsenik „medicinam Venerem (Kupfer) dealbans": man glaubte an eine Umwandlung des Kupfers in Silber. Dies erscheint begreiflich, wenn man daran denkt, daß bei den Spekulationen der Alchemisten über die Natur der Metalle neben den Komponenten Schwefel und Quecksilber gelegentlich als dritte Arsen auftritt (Albertus Magnus und Pseudo-Geber).

3. Vorkommen. Arsen gehört zu den Elementen, die sich nicht in nennenswertem Betrage an der Zusammensetzung der Erdrinde beteiligen (mit ca. 60 anderen Elementen zusammen nicht einmal 0,01%), doch ist es sehr verbreitet. Als Element findet es sich in geringer Menge als Scherbenkobalt oder Fliegenstein (fast reines Arsen, oft mit etwas Antimon, Spuren von Ag, Fe, Bi, Au); häufiger als das metallische Vorkommen sind Verbindungen mit Schwefel oder Metallen oder mit beiden zusammen, außerdem kommen — seltener — Oxyde und andere sauerstoffhaltige Arsenverbindungen vor: Realgar As_4S_4, Auripigment As_2S_3, Speiskobalt $CoAs_2$, Glanzkobalt CoAsS, Arsenkies FeAsS, Proustit (helles Rotgüldigerz) Ag_3AsS_3, Arsenikblüte oder Claudetit As_4O_6, dann die Fahlerze, Gemische von Sulfarseniden und Sulfantimoniden verschiedener Metalle. Kleine Mengen finden sich regelmäßig im vulkanischen Schwefel. Fast jeder Pyrit enthält Arsen (in dem Lauchitid der

Freiburger Gruben 4,4%), auch Steinkohle kann durch eingesprengten Pyrit oder Arsenkies Arsen enthalten; Eisenerze, Ocker aus eisenhaltigen Quellen, eisenhaltige Ackererde, Friedhofserde, eine Reihe von Gesteinen — alle enthalten mehr oder weniger Arsen. Viele Quellen sind arsenhaltig und verdanken dem Arsen ihre eigentümlichen Wirkungen (Levico, Roncegno); auch im Meerwasser läßt sich Arsen nachweisen. Sehr häufig findet es sich in Stoffen pflanzlicher und tierischer Herkunft, über das Vorkommen im einzelnen liegen vielfach widersprechende Angaben vor: fast in jedem Kohlenbogenspektrum finden sich die Arsenlinien, Holzkohlen verbreiten beim Verbrennen häufig Arsengeruch, in der Asche ist Arsen nachweisbar, ebenso soll in der Asche von Stroh und Spreu von Roggen, sowie von Kartoffelknollen Arsen enthalten sein. Auch vom tierischen und menschlichen Organismus wird Arsen in geeigneten Mengen ohne Schaden aufgenommen (Arsenikesser); über das normale Vorkommen in den einzelnen Organen besteht ebenfalls keine Uebereinstimmung, Arsen ist vor allem in der Schilddrüse enthalten (1 mg auf 127 g Schilddrüsenmasse), außerdem soll es in der Thymus und im Gehirn vorkommen; in Fischen, Muscheln, Algen soll Arsen nachgewiesen worden sein.

Sehr häufig ist das Vorkommen von Arsen in technischen Präparaten: die technische Schwefelsäure wird aus den Röstgasen arsenhaltiger Kiese hergestellt und wenn diese nicht wie beim Kontaktverfahren vorher gereinigt werden (Arsen ist ein „Katalysatorgift" für den Platinschwamm), sondern wie beim Bleikammerverfahren direkt verarbeitet werden, so gelangt das Arsen in die Schwefelsäure und mit dieser in alle Präparate, welche damit hergestellt werden (Arsengehalt des Phosphors).

4. Darstellung und Verwendung. Die Darstellung des elementaren Arsens erfolgt entweder aus dem natürlich vorkommenden gediegenen Arsen, welches durch Sublimation von Gangart und nichtflüchtigen Begleitern getrennt wird oder aus Arsenkies, der beim Erhitzen in Arsen und Eisensulfür zerfällt (in Tonröhren bei Rotglut); es bildet sich hierbei etwas Arsenik, von dem das Rohprodukt durch Wiederholung der Sublimation mit Zusatz von Kohle befreit wird (As_2O_3 ist leichter flüchtig). — Verwendung findet Arsen als Metall für Legierungen (Schrot, Spiegelmetall, Weißkupfer), in der Feuerwerkerei. Arsenik wird in der Medizin verwendet (Liquor Kalii arsenicosi, Fowlersche Lösung) und für kosmetische Präparate — Wirkung: heilsame Beeinflussung des Stoffwechsels durch Veränderung der Capillargefäße, Beförderung der Fettbildung (über Arsenikesser s. S. 582). Weiter findet arsenige Säure Verwendung in der Farbenindustrie (Schweinfurter Grün, Scheeles Grün, Reduktionen mit arseniger Säure); in der Glasindustrie nimmt man Arsenik zum Entfärben und Reinigen der Glasflüsse, in der Zeugdruckerei als Fixierungsmittel, bei der Metallbearbeitung als Beize, beim Ausstopfen von Tieren als Konservierungsmittel; die bekannteste Verwendung ist die als Rattengift. — Die Sulfide, Realgar und Auripigment, sind Malerfarben. Realgar wird außerdem in der Feuerwerkerei und in der Gerberei als Enthaarungsmittel verwendet.

5. Allgemeiner Charakter des Elements. Das Atomgewicht 75 stellt das Arsen in die 5. Vertikalreihe des periodischen Systems, in die Nachbarschaft von N.P.Sb.Bi (vertikal), Se und Ge (horizontal). Daraus lassen sich nach denselben Prinzipien, wie sie beim Phosphor angegeben wurden, Schlüsse auf das Verhalten des Elements ziehen:

5a) Allgemeiner physikalischer und chemischer Charakter: Noch in vielen Beziehungen metalloides Element; entsprechend dem höheren Atomgewicht treten aber metallische Eigenschaften stark hervor. Im Charakter der Verbindungen macht sich die „Mittelständigkeit" bemerkbar.

Bestätigung. Arsen kommt außer in einer deutlich metalloiden Modifikation, dem gelben As, und in einer halbmetallischen (metallglänzenden, aber nicht leitenden), dem schwarzen As, auch in einer vollkommen metallischen (mit Metallglanz und Leitfähigkeit für den elektrischen Strom), dem grauen Arsen, vor; ja diese ist sogar die beständigste von den Arsenmodifikationen. Als Metalloid erscheint As in seiner gasförmigen Wasserstoffverbindung AsH_3 und in seinen Sauerstoffverbindungen, die Säureanhydride sind. — Die Verbindungen sowohl mit negativen als mit positiven Elementen ($AsCl_3$, Arsenide) haben keinen Salzcharakter (Mittelständigkeit), sie werden durch Wasser vollständig zersetzt (Hydrolyse); die Phosphide der Schwermetalle haben metallisches Aussehen und metallische Eigenschaften, sie legieren sich mit Metallen, wozu eigentliche Salze nicht imstande sind.

5b) Valenz. Arsen kann drei- und fünfwertig auftreten. Dreiwertig ist es gegen Wasserstoff (negative Valenz; nach Abegg „Normalvalenz"), fünfwertig gegen Sauerstoff und die Halogene (positive Valenz; „Kontravalenz"). Nach einer oft bestätigten theoretischen Vorstellung (Abegg) sollte in der Reihe P-As-Sb mit steigendem Atomgewicht die Beständigkeit der fünfwertigen Bindung zunehmen.

Bestätigung (nur teilweise): Die höchste H-Verbindung ist AsH_3, die höchste O-Verbindung As_2O_5, die höchste Halogen-Verbindung AsF_5. Die erwartete höhere Beständigkeit der fünfwertigen Bindung gegenüber den Phosphorverbindungen ist nicht vorhanden: AsF_5 ist etwas dissoziiert, während PF_5 die theoretische Dampfdichte besitzt; $AsCl_5$ ist äußerst instabil; die Antimonverbindungen dagegen entsprechen wieder der Regel. — Für Zweiwertigkeit könnte AsS

(Realgar) in Anspruch genommen werden, doch entspricht die Dampfdichte bei 1000° doppelten, bei tieferen Temperaturen vierfachen Molekeln; es ist daher Drei- vielleicht auch Fünfwertigkeit möglich. Die zweiwertigen Verbindungen sind sehr unbeständig. — Ueber die Ionenverhältnisse s. S. 589.

5c) Molekulare Komplexe und allotrope Modifikationen: Auf Grund der Mittelständigkeit lassen sich komplexe Elementarmolekeln und allotrope Modifikationen erwarten (s. beim Phosphor). Die Beständigkeit der komplexen Elementarmolekeln nimmt in der Reihe P-As-Sb mit der negativen Elektroaffinität ab, welche für die Komplexbildung maßgebend ist.

Bestätigung. Der Arsendampf besteht bei tieferen Temperaturen aus vierfachen Molekeln; die Dissoziation tritt früher ein als beim Phosphor (vgl. S. 581).

5d) Elektroaffinität, komplexe Ionen: Aus der Stellung im System und auf der Atomvolumkurve (nahe einem Minimum; s. beim Phosphor) läßt sich nur eine geringe Affinität zum Elektron erwarten. Weder positive noch negative Einzelionen werden praktisch in Betracht kommen, dagegen ist starke Neigung zur Bildung von Komplexionen zu erwarten.

Bestätigung. Erdalkali- und Alkaliarsenide werden durch Wasser zerlegt, ebenso die Halogenverbindungen des Arsens. Trotzdem sind sowohl positive wie negative Arsenionen auch in wässeriger Lösung anzunehmen: die Fähigkeit As···-Ionen zu bilden, geht aus der Eigenleitfähigkeit des $AsCl_3$, der Leitfähigkeit des $AsBr_3$ in flüssiger SO_2, des $AsCl_3$ in verschiedenen organischen Lösungsmitteln, weiter aus dem raschen Umsatz (Ionenreaktion) des $AsCl_3$ mit Kupferoleat (s. beim Phosphor) und bei der Hydrolyse hervor: ebenso darf man aus der Hydrolyse der Arsenide auf As‴-Ionen schließen. — Durch Aufnahme von Sauerstoff im Arsenit- und Arsenation verstärkt das Einzelion seine Elektroaffinität (s. S. 542). Das Arsenition bildet weitere Komplexe.

6. Eigenschaften des Elements. Allotrope Modifikationen. Arsen kommt wie Phosphor in mehreren Modifikationen vor, deren Eigenschaften noch mehr voneinander verschieden sind als bei diesem, indem hier eine wirkliche metallische Modifikation auftritt. Es werden 3 bis 4 Modifikationen angenommen: gelbes, (braunes), schwarzes, graues Arsen.

6a) Gelbes Arsen. Gelbes Arsen entsteht durch rasche Kondensation von Arsendämpfen bei tiefen Temperaturen und Lichtabschluß. Seine Bildung bei der Arsensublimation wurde schon von Bettendorf (1867) beobachtet, diese Beobachtung wurde weiterhin teils bestritten, teils bestätigt, bis Linck die Existenz des gelben Arsens unzweifelhaft nachwies, die Kristallform feststellte, die Umwandlung in die Modifikation des Arsenspiegels und die Löslichkeit in CS_2 zeigte; ein bedeutender Fortschritt in der Darstellung gelang Erdmann, indem er die Arsendämpfe durch einen auf —26° abgekühlten CO_2-Strom kondensierte und sie unmittelbar darauf in CS_2 absorbierte — man erhält so statt des äußerst labilen festen Stoffes eine haltbare (kolloidale) Lösung mit 2 bis 3% Arsen, die aber bald gelbe Flocken abscheidet und sich auf 1,5 bis 1,8% einstellt.

100 ccm CS_2	+46°	+12°	0°	—15°	—60°
lösen bei:	11	6	4	2	1 g

Durch Abdestillieren des CS_2 (bei gewöhnlichem Druck, aber bei Lichtabschluß) kann man wieder festes gelbes Arsen erhalten, ebenso durch Fällung mit Alkohol oder durch Abkühlung mit einem CO_2-Aethergemisch (—70°); im Tageslicht scheidet sich hierbei die schwarze Modifikation aus. — Stock gibt für die Sublimation einen sehr eleganten Apparat an: im Innern eines Dewargefäßes mit flüssiger Luft wird Arsen durch elektrische Heizung verdampft und schlägt sich an den Wänden (bei Lichtabschluß) in der gelben Form nieder; die Methode eignet sich nur für geringe Mengen. — Außerdem erhält man noch kolloidale Arsenlösungen durch Reduktion von arseniger Säure und durch kathodische Zerstäubung einer As-Sb-Legierung in gekühltem CS_2 (vgl. den Artikel „Disperse Systeme“).

Gelbes Arsen kristallisiert regulär (Rhombendodekaeder), es riecht nach Knoblauch (die anderen Modifikationen sind geruchlos); die Dichte beträgt nach Erdmann bei den Temperaturen —50°, —60°, —75°: 2,35, 2,46, 2,63 (nach Link sind diese Bestimmungen nicht richtig, er selbst berechnet aus der „Eutropie“ mit weißem Phosphor (s. unten) 3,88, gibt aber zu, daß diese Zahl vielleicht nicht ganz zutrifft); außer in CS_2 löst sich gelbes Arsen auch etwas in Benzol, Glycerin und fetten Oelen. Die Lösungen sind starke Reduktionsmittel: Ag, Hg, Cu werden aus ihren Salzlösungen gefällt. Aus dem Siedepunkt wird dieselbe Molekulargröße berechnet, wie sie der Dampf besitzt, As_4.

6b) Schwarzes Arsen. Bei der Sublimation des Arsens entstehen zwei Modifikationen, das schwarze und das graue, dieses näher an der Erhitzungsstelle. Die schwarze Modifikation wird durch den für die Analyse wichtigen Arsenspiegel und durch das Mineral Arsenolamprit dargestellt, das sich von dem Scherbenkobalt besonders durch seine viel geringere Härte unterscheidet (d = 4,72). Die Kristallform konnte durch optische Untersuchung noch nicht festgestellt werden; Linck hält das schwarze Arsen für „eutropisch“ mit dem Hittorfschen Phosphor und daher für monoklin.

Der Begriff der Eutropie, den Linck aufstellt, ist eine Ergänzung des Isomorphiebegriffs: während dieser die Uebereinstimmung der Kristallform bei gleicher Struktur der Molekeln

betont, legt der Begriff der Eutropie den Nachdruck auf die immer vorhandenen Abweichungen in den kristallographischen Maßen; diese zeigen eine regelmäßige Abwandlung nach dem Atomgewicht und bilden Reihen, die mit den Reihen anderer Eigenschaften qualitativ und quantitativ übereinstimmen; die Gesetzmäßigkeit gilt für Elemente und Verbindungen: P.As.Sb.Bi und $CaCO_3.SrCO_3.BaCO_3$. Hieraus ergibt sich die Möglichkeit unbekannte Reihenglieder zu bestimmen, besonders bei polymorphen Substanzen das Kristallsystem, wenn die Einordnung in eine Reihe nach anderen Eigenschaften vorgenommen ist; umgekehrt wird es offenbar, wenn einer Substanz ein falsches Kristallsystem zuerteilt wurde: sie paßt dann nicht in die Reihe, in welche sie durch die Kristallform gestellt wird.

Das schwarze Arsen besitzt zwar Metallglanz, aber keine elektrische Leitfähigkeit.

6c) Graues Arsen. Das in der Natur vorkommende gediegene Arsen ist im wesentlichen graues Arsen (Scherbenkobalt). Es kristallisiert in Rhomboedern, ist spröde und läßt sich leicht pulvern. Spezifisches Gewicht = ca. 5,73; spezifische Wärme zwischen 21° und 68° = 0,0830, Atomwärme demnach = 6,2. Arsen kann nur unter Druck geschmolzen werden, die Sublimationstemperatur liegt nach Krafft bei ca. 550° (nach Conechy bei 450, nach Jonker bei 616).

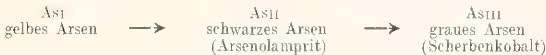
6d) Braunes Arsen. Aus Lösungen des gelben Arsens scheiden sich bei längerem Stehen braune Flocken ab (d = 3,7); die Abscheidung wird durch Spuren von $AsBr_3$, $C_2H_2Br_4$, Brom und Jod beschleunigt. Wird ein solcher Katalysator zugesetzt (z. B. Acetylentetrabromid), so entsteht bei der Fällung mit Alkohol nicht wie sonst schwarzes, sondern braunes Arsen; andere Bildungsweisen sind: Einleiten von Sauerstoff in Lösungen von gelbem Arsen, Umsetzung von $AsCl_3$ mit PCl_3, von $AsCl_3$ mit flüssigem oder gelöstem AsH_3.

6e) Arsendampf. Alle Modifikationen geben denselben gelblichen Dampf. Die Dampfdichte wurde von V. Meyer und Biltz bestimmt (vgl. oben S. 543):

Temperatur	644°	670°	564°	860°	1325°	1437°	1715°	1730
Molekulargewicht . . .	309	308	306	295	278	189	157	160°
		As_4		$As_{3\cdot93}$	$As_{3\cdot70}$	$As_{2\cdot52}$	$As_{2\cdot1}$	

Während also die Molekulargröße des Dampfes mit der Molekulargröße der gelösten gelben Modifikation übereinstimmt, ergeben sich für das in Metallen gelöste metallische Arsen andere Molekulargrößen: in Blei und Cadmium ist es — wie die meisten Metalle — in Form von Atomen gelöst, in Wismut dagegen in Form von 3-atomigen Molekeln.

6f) Die Beziehungen der Arsenmodifikationen zueinander und zu den Modifikationen der Nachbarelemente. Die Arsenmodifikationen ordnen sich nach ihrer Stabilität in die Reihe:



Das braune Arsen wäre zwischen As_I und As_{II} einzuordnen.

Die am wenigsten stabile Modifikation ist das gelbe Arsen, nur bei völligem Lichtabschluß und Temperaturen unter —65° kann es dauernd aufbewahrt werden. Die Empfindlichkeit gegen Licht ist ganz außerordentlich, sie besteht noch bei der Temperatur der flüssigen Luft, am größten ist sie gegen die violetten und ultravioletten Strahlen, am geringsten gegen die roten. Nur die feste Substanz ist empfindlich, die Lösungen nicht. Man kann von CS_2-Lösungen das Lösungsmittel abdestillieren, ohne daß eine Umwandlung eintritt — es scheidet sich gelbes Arsen aus; ebenso findet im Licht nur, sehr langsam, Abscheidung von braunem Arsen ab, während die feste Substanz sich in schwarzes umwandelt. Das gelbe As ist mit dem gewöhnlichen weißen Phosphor eutropisch.

Durch Belichtung und Erwärmung geht das gelbe Arsen in das schwarze über, in die Modifikation des Arsenspiegels und Arsenolamprits. Nach Linck ist es eutropisch mit dem Hittorfschen Phosphor. Durch Erwärmen geht es in graues Arsen über.

Neben dieser Umwandlung des festen gelben Arsens steht die Umwandlung des gelösten in braunes Arsen. Diese erfolgt ebenfalls durch Belichtung und kann katalytisch beschleunigt werden; bei Gegenwart der Katalysatoren entsteht braunes Arsen auch bei Reaktionen, die sonst zu schwarzem führen. Erdmann gibt dem braunen Arsen die Formel As_8; Linck sieht darin die isotrope Phase des schwarzen Arsens und ordnet es dem hellroten Phosphor zu (s. die Tabelle).

Durch Erhitzen gehen alle Arsenmodifikationen schließlich in das graue Arsen über; dieses ist die einzige Arsenmodifikation, welche Leitfähigkeit besitzt. Erdmann fand, daß das schwarze Arsen bei ca. 360° leitend wird, während früher als Umwandlungstemperatur 360° angenommen wurde (Jolibois gibt 280° an); bei der Umwandlung

findet eine starke Wärmeentwickelung statt.

Die Frage, ob bei den Arsenmodifikationen Polymerie oder Polymorphie vorliegt, ist noch nicht entschieden; bei der Umwandlung gelb-schwarz spricht die Lichtempfindlichkeit für Polymerie. Erdmann nimmt für alle 3 Modifikationen Polymerie an nach dem Schema: As_4 (gelb) → As_2 (schwarz) → As_1 (grau, metallisch).

Tabelle der Arsenmodifikationen (nach Linck).

Modifikation	PI	AsI	SbI	BiI
Kristallsystem	regulär	regulär	regulär	unbekannt
spez. Gewicht	1,83	?	?	
Farbe	weiß, durchsichtig	gelb, durchsichtig	gelb, durchsichtig	
Name	weißer Phosphor	gelbes Arsen	gelbes Antimon	
Modifikation	**PII**	**AsII**	**SbII**	**BiII**
Kristallsystem	monoklin	monoklin	monoklin	unbekannt
Farbe	braunrot	schwarz, braun-durchscheinend	schwarz	
spez. Gewicht	2,34	4,71	5,3	
Name	roter Phosphor	schwarzes Arsen, Spiegelarsen, Arsenolamprit	schwarzes Antimon Spiegelantimon	
Isotrope Phase	hellroter Phosphor	braunes Arsen	unbekannt	
Modifikation	**PIII**	**AsIII**	**SbIII**	**BiIII**
Kristallsystem	unbekannt	rhomboedrisch	rhomboedrisch	rhomboedrisch
Farbe		grau-metallisch	grau-weiß-metallisch	rötlich überweiß metallisch
spez. Gewicht		5,727	6,71	9,76
Name		metallisches Arsen Scherbenkobalt	metallisches Antimon	metallisches Wismut

6g) Chemische Eigenschaften. Mit Wasserstoff verbindet sich Arsen nicht direkt, es ist im H-Strom unverändert flüchtig. Mit feuchtem Sauerstoff verbindet sich das metallische Arsen bei gewöhnlicher Temperatur langsam zu As_2O_3, es kann sich dabei bis zur Entzündung erhitzen (schwarzes Arsen soll beständig sein); beim Erhitzen verbrennt es unter Bildung eines rötlichen nach Knoblauch riechenden Rauches. — Mit S, Se, Te, T, Sb und Bi verbindet sich Arsen direkt beim Erhitzen; N, B, C wirken nicht ein. — Mit den Halogenen findet heftige Verbindung statt, mit F und Cl unter Feuererscheinung. — Oxydierende Säuren lösen unter Bildung von As_2O_3 und As_2O_5, andere sind ohne Wirkung. — Mit den meisten Metallen vereinigt sich Arsen zu Arseniden und Arsenlegierungen.

6h) Physiologische Wirkungen. Das Arsen bildet mit Phosphor und Antimon zusammen eine toxikologische Gruppe; alle drei sind furchtbare Protoplasmagifte. Die Arsenverbindungen sind alle giftig, auch die unlöslichen, da sie im Körper gelöst werden. Bei der akuten Vergiftung unterscheidet man die paralytische, die direkt auf die Nervenzentren und das Herz geht, und die gastro-intestinale, bei der mehr Magen-Darm-Symptome hervortreten: hochgradige Hyperämie, Erweiterung der Blutgefäße der Magen- und Darmschleimhaut, Herabsetzung des Blutdrucks, schließlich Herzlähmung. Symptome der chronischen Vergiftung sind: Schleimhautkatarrhe, Verfettung der Gewebe, chronische Nierenentzündung, motorische Lähmungen, Gehirnstörungen. — Einatmung von AsH_3 bewirkt Kopfschmerzen, Veränderung der roten Blutkörperchen, Auftreten von Blut im Harn;

Einige der erwähnten Arsenwirkungen werden mit Absicht durch geeignete Dosierung in der gewünschten Stärke hervorgerufen (Erweiterung der Blutgefäße, Beförderung der Fettbildung s. o. S. 579). In einigen Alpenländern (Tirol, Steiermark) ist der Genuß von Arsenik eine verbreitete Gewohnheit; es werden Dosen ertragen, die beim ersten Genuß, ohne Gewöhnung, unbedingt tödlich wären (bis zum 4-fachen der letalen Dosis); die Leute befinden sich wohl dabei und behaupten, leichter die Anstrengungen des Bergsteigens ertragen zu können. Ob die Gewöhnung durch verringerte Absorption im Darm oder durch eigentliche Immunisierung zu erklären ist, ist noch unentschieden. — Ebenso steht noch nicht fest, in welchen Organen und in welcher Menge das Arsen einen normalen Bestandteil des menschlichen und tierischen Körpers bildet (vgl. 3). Interessant ist, daß Arsen auch ein „Katalysatorgift" ist: beim H_2SO_4-Kontaktverfahren und bei der Katalyse des H_2O_2 durch kolloidales Platin.

7. Analytisches. Da Arsen ein Gift ist, hat der genaue Nachweis gerichtliche Bedeutung. Um in Speisen oder Leichen

teilen Arsen festzustellen, behandelt man diese mit starker Salzsäure und destilliert, wobei das Arsen als $AsCl_3$ übergeht. Mit dem Destillat wird die Marshsche Probe angestellt, d. h. man entwickelt in der Lösung Wasserstoff, der das Arsen in flüchtigen AsH_3 überführt; die Anwesenheit von Arsen erkennt man an der fahlen Farbe der Wasserstoffflamme und daran, daß sich beim Erhitzen der Ableitungsröhre hinter der erhitzten Stelle ein „Arsenspiegel" absetzt (freies Arsen durch Zersetzung des AsH_3); der Arsenspiegel wird von Natriumhypochloritlösung gelöst. — Andere Methoden sind: Einwirkung von AsH_3 auf $AgNO_3$ (gelber Fleck; durch Wasser schwarz), Fällung mit H_2S, Reduktion mit $SnCl_2$ (Bettendorfsches Reagenz) zu elementarem Arsen. Festes As_2O_3 wird in einem Röhrchen mit Kohle erhitzt; es bildet sich im oberen Teil ein spiegelnder Ring von Arsen; oder man reduziert in der reduzierenden Flamme auf Kohle: knoblauchartiger Geruch. Näheres siehe im Artikel „Chemische Analyse".

Eine interessante Methode ist der biologische Arsennachweis: eine Kultur von Penicillium brevicaule entwickelt auf Zusatz von arseniger Säure einen intensiven knoblauchartigen Geruch (organische Arsenverbindungen). Man kann 0,01 mg noch mit Sicherheit nachweisen, die Grenze liegt bei ungefähr 0,001 mg. Auch unlösliche Verbindungen (die Sulfide, Scheeles Grün) geben die Reaktion; andere Elemente nicht.

8. Spezielle Chemie. Arsen zeigt in seinen Verbindungen große Aehnlichkeit mit Phosphor und Antimon, zwischen analogen Verbindungen der 3 Elemente besteht Isomorphismus; dieser wurde ja von Mitscherlich bei seinen Untersuchungen über phosphor- und arsensaure Salze entdeckt. — Arsen tritt zwei- (?), drei- und fünfwertig auf (vgl. S. 579). Das Volum des Arsens in seinen Verbindungen beträgt 26,4 (Kopp; aus $AsCl_3$); die Atomrefraktion für die Wasserstofflinie α ist 20,22 (n-Formel).

8a) As^{II}-Verbindungen. Man kennt nur wenige Verbindungen des unbeständigen zweiwertigen Arsens. In wässeriger Lösung zerfallen die As^{II}-Verbindungen in elementares Arsen und As^{III}-Verbindungen; die Schnelligkeit dieses Zerfalls läßt auf eine Ionenreaktion schließen: $3As^{\cdot\cdot} \rightarrow As + 2As^{\cdot\cdot\cdot}$, ein Analogon zu der Selbst-Oxydation-Reduktion der einwertigen $Cu^{\cdot}$- und $Hg^{\cdot}$-Ionen. Das Gleichgewicht $(As^{\cdot\cdot})^3/(As^{\cdot\cdot\cdot})^2$ ist noch nicht festgestellt.

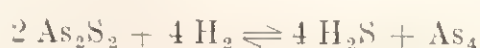
Arsenbijodid As_2J_4. Es entsteht beim Erhitzen der Bestandteile im Formelverhältnis auf 230°, oder durch Reduktion von AsJ_3 in CS_2-Lösung durch elementares Jod bei 150°; beides im geschlossenen Rohr. — Rote Prismen, in Chloroform, Alkohol und Aether löslich; sehr empfindlich, leicht oxydierbar, zerfällt mit Wasser in As und AsJ_3.

Arsendisulfid As_4S_4. Das Mineral Realgar ist As_4S_4, es war schon im Altertum bekannt (σανδαράχη). As_4S_4 entsteht durch Zusammenschmelzen der Bestandteile im Formelverhältnis oder von As_2S_3 mit Arsen oder von As_2O_3 mit Schwefel. — Es wird technisch dargestellt und bildet neben As_2O_3 den Hauptbestandteil des roten Arsenikglases aus Schwefelkies und Arsenkies. — Künstlich dargestellt, bildet As_4S_4 eine rote kristalline Masse; Realgar kristallisiert in rubinroten monoklinen Kristallen (spezifisches Gewicht 3,5 bis 3,6). — As_4S_4 schmilzt leicht und verdampft bei höheren Temperaturen:

Temperatur . . .	450	503	514	574	588	ca. 1000°	ca. 1200°
Dampfdichte . . .	19,16	18,5	15,9	13,84	12,52	7,51	6,95

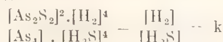
Der theoretische Wert für As_2S_2 ist 7,40; er wird bei etwas über 1000° erreicht. — As_4S_4 verbrennt zu As_2O_3 und SO_2, unterhalb der Entzündungstemperatur bildet sich nur As_2S_3 und As_2O_3; Wasserdampf bei hohen Temperaturen gibt dieselben Produkte dazu H_2S; konz. H_2SO_4 gibt As_2O_3 und SO_2; heiße Salpetersäure oxydiert zu Arsensäure und Schwefelsäure; Wasserstoff reduziert zu elementarem Arsen.

Die Reduktion durch Wasserstoff ist nur vollständig, wenn die Reaktionsprodukte fortwährend entfernt werden, also im Wasserstoffstrom. Im geschlossenen Raum stellt sich ein Gleichgewicht ein:



$$2\,As_2S_2 + 4\,H_2 \rightleftharpoons 4\,H_2S + As_4$$

Man erhält:



$$\frac{[As_2S_2]^2 . [H_2]^4}{[As_4] . [H_2S]^4} = \frac{[H_2]}{[H_2S]} = k$$

Die vereinfachte Form ergibt sich, wenn die Konzentrationen des Disulfids und des metallischen Arsens als konstant betrachtet werden dürfen: dies ist der Fall, wenn das geschmolzene Disulfid mit Arsen gesättigt ist. Pélabon fand bei 610° für k den Wert 3.7. Ist Arsen nicht in fester Phase vorhanden, so treten Komplikationen ein. —

Beim Erhitzen mit Alkalien und Schwefelalkalien im geschlossenen Rohr entsteht Sulfarseniat.

8b) As^{III}-Verbindungen. α) Arsenwasserstoffe. — Gasförmiger Arsenwasserstoff. AsH_3. Die Verbindung wird nicht durch direkte Vereinigung der Elemente erhalten, sondern durch Reduktion von Sauerstoffverbindungen mit naszierendem Wasserstoff oder durch Einwirkung von Säuren auf Arsenmetalle. Die erste Darstellungsmethode ist historisch: Scheele erhielt 1755 AsH_3, als er Zink mit Arsensäure behandelte; die zweite ergibt in bequemer

Weise einen ziemlich reinen AsH_3: man zersetzt Arsenzink mit verdünnter H_2SO_4 und kondensiert das entstehende Gas in flüssiger Luft. — Die Reduktion der Sauerstoffverbindungen durch naszierenden H_2 ist außerdem von Bedeutung für die Analyse (s. o.).

AsH_3 ist ein farbloses Gas von widerlichem, knoblauchartigem Geruch; es ist sehr giftig (s. oben 6h). — Die Dichte auf H_2 bezogen ist 38,9. In Wasser ist es wenig löslich, reichlich in Terpentinöl. — Durch Druck und Abkühlung geht es in eine Flüssigkeit über, die bei -55^0 siedet, und bei -119^0 fest wird (Olszewski).

Durch hohe Temperatur und elektrische Funken wird der AsH_3 in Arsen und Wasserstoff gespalten, es tritt hierbei eine Volum- (oder Druck-) vermehrung auf das $1\frac{1}{2}$fache ein: $4AsH_3 = A_4 + 6H_2$. Die Untersuchungen van't Hoffs schienen auf eine monomoleku are Reaktion hinzuweisen ($AsH_3 = As + 3H$), doch haben spätere Untersuchungen (Stock) ergeben, daß es sich beim AsH_3 und beim SbH_3 (siehe dort die ausführliche Darstellung) gar nicht um Reaktionen im homogenen System handelt, sondern daß sich der Vorgang in einer Absorptionsschicht an den Gefäßwänden und hauptsächlich an dem ausgeschiedenen Arsen und Antimon abspielt, von deren Beschaffenheit die Geschwindigkeit wesentlich abhängt. Die Zersetzung des AsH_3 unterscheidet sich von der des SbH_3 dadurch, daß sie nicht wie diese bei gewöhnlicher oder wenig höherer Temperatur mit meßbarer Geschwindigkeit verläuft, sondern daß dazu eine Erwärmung auf ca. 300^0 nötig ist, zweitens dadurch, daß die Bildung des „Arsenspiegels" (s. S. 599) sehr ungleichmäßig erfolgt, wodurch Schwankungen in der Zerfallsgeschwindigkeit bedingt werden, die sich nicht in Rechnung setzen lassen; trotzdem konnte ein deutliches Ansteigen der Geschwindigkeit mit Abnahme der Konzentration beobachtet werden, womit die Hypothese bestätigt und der Zerfall des AsH_3 dem bequemer zu beobachtenden des SbH_3 gleich gestellt wird. — Eine „Vergiftung" des Spiegels durch Sauerstoff oder H_2S konnte nicht beobachtet werden.

Auch bei gewöhnlicher Temperatur findet aber Zerfall statt, der durch feinfaserige Stoffe beschleunigt wird (Baumwolle, Glaswolle). Das AsH_3 labil sein muß, geht schon aus der negativen Bildungswärme hervor (—36,7 Cal.); durch Knallquecksilber wird explosiver Zerfall eingeleitet.

Das Gas verbrennt mit bläulich fahler Flamme zu As_2O_3; bei unvollständiger Verbrennung (Sauerstoffmangel oder rasche Abkühlung) entsteht elementares Arsen. — Ein AsH_3-O_2-Gemisch explodiert angezündet heftig, sehr stark ist auch die Reaktion mit den Halogenen. Erhitzter Schwefel gibt Arsensulfid und H_2S, ähnlich verhält sich Phosphor.

AsH_3 ist ein Reduktionsmittel, aus $AuCl_3$-Lösung wird Gold, aus $AgNO_3$-Lösung Silber gefällt; der AsH_3 geht dabei in arsenige Säure über, während SbH_3 bei der Reduktion elementares Antimon abscheidet; ebenso wie SbH_3 verhält sich AsH_3 in einigen anderen Fällen, z. B. gegenüber Cu-Salzen.

Fester Arsenwasserstoff As_2H_2. Die Existenz dieser Verbindung wurde von Reckleben mit Hilfe der Reaktion: $As_2H_2 + 6Ag_2O = 12Ag + As_2O_5 + H_2O$ nachgewiesen; das bei der Reduktion ammoniakalischer Silbernitratlösung ausgeschiedene elementare Silber steht in einem für jede Arsenverbindung charakteristischen Atomverhältnis zum Arsen. — Fester Arsenwasserstoff entsteht bei der Einwirkung der dunklen Entladung auf AsH_3, bei der Zersetzung von Arsenalkalimetallen durch Wasser, sowie bei der unvollständigen Oxydation von AsH_3 durch Sauerstoff oder Luft in der Kälte, nicht enthalten ist er in dem Arsenfleck, der beim Abkühlen der AsH_3-Flamme entsteht. — As_2H_2 zerfällt beim Erwärmen (schon bei 100^0) und ist sehr oxydabel.

Arsenide. Arsenlegierungen. Die Arsenide können als „Salze" der Arsenwasserstoffe betrachtet werden (vgl. S. 558). Zahlreiche Arsenmetalle kommen als Mineralien vor ($FeAs_2$, $FeAsS$ u. a.). Man erhält sie durch Erhitzen der Komponenten oder von arseniger Säure mit Metall und Kohle, bei der Reduktion von Arsenaten mit Kohle im elektrischen Ofen; auf nassem Wege aus Metallsalzlösungen durch AsH_3 ($CuAs$) und aus $AsCl_3$ durch Einwirkung von Metallen. Die Metallarsenide sind nach sehr verschiedenen Typen zusammengesetzt, welche von der gewöhnlichen „Salzvalenz" unabhängig erscheinen: R_5As_4, R_3As_2, R_2As, R_5As_2 (R = zweiwertiges Metall). Je näher sich die Komponenten im periodischen System stehen, desto ausgeprägter ist der metallische Charakter der Verbindung, die Legierungsfähigkeit, die Beständigkeit gegen Wasser und Säuren: mit Antimon bildet Arsen Legierungen mit einem Höchstgehalt von 35% Arsen (Mischkristalle); mit Mangan bildet sich eine Verbindung $MnAs$ mit ferromagnetischen Eigenschaften, die beim Erhitzen auf 40 bis 50^0 verschwinden und beim Abkühlen wieder auftreten; je weiter die Komponenten auseinander stehen, desto mehr tritt der Salzcharakter hervor; Zinkarsenid wird durch Säuren leicht zersetzt; Alkali- und Erdalkaliarsenide schon durch Wasser. Schmelzen mit Soda und Salpeter oder mit Schwefel und Soda führt in arsensaures Natrium und Metalloxyd oder in sulfarsensaures Natrium und Metallsulfid über.

Alkylverbindungen. Arsine. Ebenso wie beim NH_3, PH_3, SbH_3 kennt man auch

beim AsH_3 organische Derivate. Die Darstellungsmethoden und die einzelnen Verbindungen sind im Artikel „Organische Verbindungen der Metalle“ behandelt; hier soll hauptsächlich auf einige Punkte von theoretischer Bedeutung hingewiesen werden. — Die am längsten bekannte organische Arsenverbindung ist die „Cadetsche Flüssigkeit“ (1760), die bei der Destillation von As_2O_3 mit essigsaurem Kali entsteht: $[(CH_3)_2As]_2O$, das Oxyd des „Kakodyls“. Die Erforschung der Kakodylverbindungen durch Bunsen war von großer Bedeutung für die „Radikaltheorie“: das Radikal „Kakodyl“ verhält sich wie ein chemisches Element, es geht unverändert durch eine Reihe von Verbindungen: aus dem Oxyd erhält man mit HCl das Chlorid, mit KCN das Cyanid, auch das Sulfid und andere Verbindungen sind bekannt, Oxydationsmittel führen in Kakodylsäure über, Reduktionsmittel ergeben wieder freies Kakodyl, dem aber die Formel $(CH_3)_4As_2$ zukommt — $(CH_3)_2As$ ist wie CH_3 nicht beständig. — In neuester Zeit haben die arsenorganischen Verbindungen durch die Präparate von Ehrlich für die Behandlung der Syphilis große Bedeutung erlangt (vgl. den Artikel „Pharmazeutische Präparate“). — Durch die organischen Gruppen wird der basische Charakter des AsH_3 verstärkt; am deutlichsten wird dies bei den Tetraalkylarsoniumsalzen, die Neutralsalze mit guter elektrischer Leitfähigkeit sind, und den entsprechenden Tetraalkylarsoniumhydroxyden, die starke Basen sind, CO_2 anziehen und beinahe völlig dissoziiert sind:

	$v =$	16	32	128	1024
$(CH_3)_4AsCl$	$\lambda =$	—	100,2	108,0	112,9
$(C_2H_5)_4AsCl$	$\lambda =$	—	91,5	99,1	104,3
$(CH_3)_4AsOH$	$\lambda =$	211	210		

b) Halogenverbindungen des As^{III}. Es sind stabile Verbindungen, während von den Pentahalogeniden, wie schon erwähnt nur das AsF_5 sichergestellt ist. Auch bei den Trihalogeniden nimmt die Beständigkeit, wenn man die Bildungswärme als ungefähres Maß nimmt, mit steigendem Atomgewicht ab:

	$AsFl_3$	$AsCl_3$	$AsBr_3$	AsJ_3
Bildungswärme	—	71,3 (fl.)	45,5 (fest)	13,5 (fest)
Dichte	2,7 (fl.)	2,2 (fl.)	3,7 (fest)	4,4 (fest)
Schmelzpunkt	$-8,3^0$	-18^0	31^0	146^0
Siedepunkt	63^0	$130,2^0$	221^0	ca. 400^0

Arsentrifluorid AsF_3. Es entsteht aus den Elementen, aus As_2O_3 und HFl oder beim Erhitzen von As_2O_3 mit Kaliumfluoridfluorwasserstoff im geschlossenen Rohr. Darstellungsmethode: Erhitzen eines Gemisches von As_2O_3 und KF mit konzentrierter H_2SO_4. Das Destillationsprodukt wird in einer Bleivorlage aufgefangen und in Platinapparaten rektifiziert. — AsF_3 ist eine farblose, bewegliche, an der Luft rauchende Flüssigkeit ($d = 2,73$), die bei $-8,3^0$ erstarrt und bei 63^0 (750 mm) siedet. — $AsFl_3$ ist sehr reaktionsfähig und dient zur Darstellung vieler Fluorverbindungen: Die Chloride des Phosphors werden in Fluoride umgewandelt, Glas wird, besonders von dem feuchten Gas, stark angegriffen, es bildet sich SiF_4 und As_2O_3.

Arsentrichlorid $AsCl_3$. Arsentrichlorid wurde zuerst von Glauber (1648) aus Kochsalz, Arsenik und konzentrierter H_2SO_4 erhalten; es entsteht auch, wie das PCl_3, durch Verbrennen des Elements im Chlorstrom. — $AsCl_3$ ist eine farblose, ölige Flüssigkeit, die bei -18^0 erstarrt und weiße glänzende Kristalle bildet ($d_{20} = 2,1668$); der Kp. liegt bei $130,2^0$ (760 mm); die Dampfdichte ist normal (6,301 statt 6,287). — $AsCl_3$ besitzt eine ganz außerordentliche Mischbarkeit und Lösungsfähigkeit: es mischt sich mit organischen Lösungsmitteln wie Chloroform, Aether, Tetrachlorkohlenstoff, mit flüchtigen und fetten Oelen, es löst Phosphor, Schwefel und Jod, sowie — was von besonderem Interesse ist — eine ganze Reihe von Salzen und Säuren: KJ, RbJ, HgJ_2, SbJ_3, CoJ_2, $FeCl_3$, CBr_3COOH, $[CH_3]_4NJ$, $[CH_3]_3SJ$. Merkwürdig sind die Leitfähigkeitsverhältnisse dieser Lösungen. Das reine $AsCl_3$ zeigt ein deutliches Leitvermögen: die untere Grenze der spezifischen Leitfähigkeit beträgt $1,24 \times 10^{-6}$. Der großen Dielektrizitätskonstanten (12,8 bei 20^0) entspricht ein beträchtliches Dissoziierungsvermögen für eine Reihe von Salzen, wie $(CH_3)_4NJ$ und $(CH_3)_3SJ$; andere dagegen, wie CoJ_2, sowie starke Säuren, wie CBr_3COOH, vermindern sogar die Leitfähigkeit des reinen Lösungsmittels.

Die wässerige Lösung enthält trotz der praktisch vollständigen Hydrolyse Arsenionen, da durch den elektrischen Strom an der Kathode Arsen ausgeschieden wird. Aus der Leitfähigkeit läßt sich kein Urteil über die Konzentration dieser Ionen gewinnen, da zwischen der Leitfähigkeit einer $AsCl_3$-Lösung und einer äquivalenten HCl-Lösung kein Unterschied besteht:

	$HCl + As(OH)_3$	HCl	
v	λ	λ'	λ' − λ
16	366,3	368,5	+ 2,2
64	379,6	379,2	+ 0,6

Weiter geht die Fähigkeit zur Bildung von Arsenionen aus der Leitfähigkeit von Lösungen des $AsCl_3$ in Aethylacetessigester und Nitrobenzol hervor, wo keine Hydrolyse möglich ist. — Das Potential einer As-Elektrode gegen eine äquivalente $AsCl_3$-Lösung beträgt 0,27 Volt (ε_h). —

Hydrolyse des $AsCl_3$. $AsCl_3$ wird, wie erwähnt, in verdünnter wässeriger Lösung praktisch vollständig in arsenige Säure und Salzsäure gespalten, doch ist die Reaktion umkehrbar: aus konzentrierter salzsaurer Lösung kann $AsCl_3$ abdestilliert werden, durch konzentrierte H_2SO_4 (Wasserentziehung) wird $AsCl_3$ ausgefällt. Vielleicht ist in der Lösung auch eine komplexe Arsenchlorürchlorwasserstoffsäure enthalten.

Arsentrichlorid löst größere Mengen Jod auf; mit steigender Temperatur nimmt die Löslichkeit stark zu; 100 Teile $AsCl_3$ lösen bei:

0°	15°	96°	
8,42	11,88	36,89	Teile Jod

Mit Ammoniak und Metallchloriden werden Additionsverbindungen gebildet.

Arsenchlorür zersetzt sich mit AsH_3 zu As und HCl, Metalle geben Chlorid und As.

Arsentribromid $AsBr_3$. Arsentribromid entsteht durch Verbrennung von Arsen in Bromgas, bequemer durch Eintragen von gepulvertem Arsen in eine Lösung von Brom in CS_2. Es ist eine weiße kristalline Masse ($d_{15} = 3,66$). Der Schmelzpunkt liegt bei 31° und wird durch gelöste Stoffe sehr stark erniedrigt; die molekulare Gefrierpunktsdepression hat den hohen Wert 189; das $AsBr_3$ wird deshalb häufig als kryoskopisches Lösungsmittel verwendet. Das flüssige $AsBr_3$ siedet bei 221°; die Dielektrizitätskonstante beträgt bei 35° 8,33; die elektrische Leitfähigkeit ist wie beim $AsCl_3$ deutlich, sie beträgt $1,53 \times 10^{-6}$ bei 33°. Wie das $AsCl_3$ ist auch das $AsBr_3$ ein vielseitiges Lösungsmittel; leichtlöslich sind: HgJ_2, AsJ_3, SbJ_3, $SbCl_3$, $POBr_3$, $SnBr_4$, SnJ_2 und viele organische Stoffe; schwerlöslich sind: KBr, $FeCl_3$, $AlCl_3$; fast gar nicht löslich sind: KJ, CoJ_2.

In wässeriger Lösung ist $AsBr_3$ wie $AsCl_3$ hydrolytisch gespalten. Wie $AsCl_3$ zeigt es auch in nicht wässerigen Lösungsmitteln, z. B. in flüssigem SO_2, Leitfähigkeit: ein Beweis für die Bildung von Arsenionen. Und ebenso wie das Chlorür vermag schließlich das Bromür gelöste Salze zu ionisieren, aber in geringerem Maße als jenes. Die größte Leitfähigkeit zeigt das $(C_2H_5)_4NJ$, sehr schwach ionisiert sind die Jodide des Sb und Sn, etwas mehr das $FeCl_3$. Die Tabelle gibt die Leitfähigkeiten für 33°:

	SbJ_3	SnJ_4	$FeCl_3$	$(C_2H_5)_4NJ$	
v	100	100	100	167	500
λ	0,104	0,0969	0,325	14,6	19,4

Mit Alkalibromiden und mit NH_3 bilden sich Additionsverbindungen ($AsBr_3 . NH_3$).

Arsentrijodid AsJ_3. Arsentrijodid entsteht durch Zusammenschmelzen der Komponenten oder besser, wie das Tribromid, durch Einwirkung von gepulvertem Arsen auf Jodlösungen. Weitere Reaktionen sind: Einwirkung von AsH_3 auf Jodlösung und von $AsCl_3$ auf HJ. — AsJ_3 bildet hexagonale Kristalle vom spezifischen Gewicht 4,39. Der Fp. liegt bei 146°, der Kp. bei ca. 400°. Der Dampf ist gelb gefärbt und besitzt ungefähr normale Dichte (16,1 statt 15,795). Die Dielektrizitätskonstante des flüssigen AsJ_3 beträgt bei ca. 150° 7,0.

Die Verhältnisse der wässerigen Lösungen entsprechen denen des $AsCl_3$: praktisch vollständige Hydrolyse bei verdünnten Lösungen, fast kein Unterschied der Leitfähigkeit gegenüber einer äquivalenten HJ-Lösung, Gleichgewicht mit den Produkten der Hydrolyse (aus konzentrierten Lösungen kann AsJ_3 abdestilliert werden), Ausscheidung von elementarem Arsen an der Kathode (also Arsenionen, aber in geringerer Konzentration als beim $AsCl_3$; das Potential ist um 0,01 Volt negativer).

Mit Ammoniak und Alkalijodiden werden unbeständige Additionsverbindungen gebildet; mit SbJ_3 bildet AsJ_3 eine lückenlose Reihe von Mischkristallen.

γ) Sauerstoffverbindungen des As_{III}. — Arsentrioxyd As_2O_3. Arsenik war schon im Mittelalter bekannt (Geber, Basilius Valentinus); die Mineralien Arsenolith oder Arsenblüte (regulär) und Claudetit (monoklin) sind As_2O_3.

As_2O_3 entsteht beim Rösten arsenhaltiger Erze und Hüttenprodukte, vor allem des Arsenkieses und der Kobaltspeisen: der „Flugstaub" wird in den „Gifttürmen" kondensiert; je nach der Geschwindigkeit der Abkühlung entsteht glasiges oder pulveriges Arsentrioxyd.

As_2O_3 ist in 3 Modifikationen bekannt, einer amorphen und zwei kristallisierten (einer regulären und einer monoklinen).

Die amorphe Modifikation wird bei der langsamen Abkühlung der Dämpfe erhalten (Arsenglas). Spezifisches Gewicht = 3,71, spezifische Wärme (13° bis 97°) = 0,12764. Die Angaben über die Löslichkeit zeigen starke Abweichungen; der Grund ist in der Umwandlung der amorphen in die reguläre Modifikation zu sehen; Cl. Winkler gibt an, daß 100 Teile Wasser von mittlerer Temperatur 3,7 Teile amorphes Arsen lösen.

Das amorphe As_2O_3 ist sehr unbeständig. An feuchter Luft (sogar an mit $CaCl_2$ getrockneter) überzieht es sich mit einer porzellanartigen Schicht, die aus kleinen

Oktaedern besteht; auch unter Alkohol und Aether tritt die Umwandlung ein; die Umwandlungswärme amorph-kristallisiert ist für 1 g-Mol As_4O_6 5,337 Cal.

Die reguläre Modifikation entsteht bei rascher Abkühlung des Dampfes und kommt in der Natur als Arsenblüte vor; schöne Kristalle werden aus salzsaurer oder alkalischer Lösung erhalten. — Die Dichte ist kleiner als die des amorphen As_2O_3, sie beträgt nach Cl. Winkler 3,6461; die spezifische Wärme zwischen 13° und 97° ist 0,12764.

Die Löslichkeit in Wasser ist gering, die Lösungswärme ist negativ (— 7,580 Cal.) und der Sättigungszustand wird sehr langsam erreicht (60 bis 100 g Arsenik auf 1 l Wasser müssen 15 bis 18 Stunden andauernd gerührt werden; Bruner und Tolloczko):

		dC/dt
2°	12,006 g i. L.	0,3508 g
15°	16,566 „	0,3838 „
25°	20,384 „	0,6025 „
39,8°	29,032 „	
Kp >	60.	

Cl. Winkler fand bei Zimmertemperatur 17 g i. L.; Wood bei 15° 14,95 g. Der Vergleich mit der Löslichkeit der amorphen labilen Modifikation (37 g i. L.) bestätigt die allgemeine Ueberlegung, daß die labile Modifikation die größere Löslichkeit haben muß. Auch in ihrer Reduktionskraft zeigen die beiden Modifikationen einen Unterschied: nur durch amorphes As_2O_3 wird aus Goldlösungen Gold ausgeschieden und Jod zu HJ reduziert.

Durch Zusatz von HCl wird zunächst eine Abnahme der Löslichkeit bewirkt bis zu einem Minimum von 11,1 g i. L. bei einem 3,2-n Säuregehalt, von da an steigt die Löslichkeit rasch und erreicht 181,6 g i. L. bei einem 9,17-n Säuregehalt.

Aus dem Temperaturkoeffizienten der Löslichkeit berechneten Bruner und Tolloczko nach der van't Hoffschen Gleichung die Lösungswärme zu — 3,74 Cal. Der Vergleich mit der kalorimetrisch für As_2O_3 gefundenen (— 7,580) zwingt zu der Annahme, daß der wirkliche Lösungsvorgang, auf den sich die van't Hoffsche Gleichung bezieht, die Lösung eines Hydrats des As_2O_3 ist, der die Aufspaltung des As_2O_3 in zwei Moleküle vorausgeht. Es liegt nahe, anzunehmen, daß diese Aufspaltung für die Lösungsgeschwindigkeit im ganzen entscheidend ist, und diese Vermutung wurde durch die Untersuchungen bestätigt. Zunächst zeigte sich, daß die Geschwindigkeit nicht durch die normalerweise geltende Formel $dC/dt = k\,(C_1—C)$ bestimmt, also dem Abstand vom Sättigungszustand proportional ist; weiter zeigte sich, daß die Geschwindigkeit durch H·- und noch mehr durch OH'-Ionen katalytisch beeinflußt wird, dies ist aber ein wesentliches Merkmal der Hydratationsvorgänge. Die Diffusion scheint ohne große Bedeutung zu sein, da durch Rühren die Geschwindigkeit nicht wesentlich vermehrt wird. Bruner schließt daraus, daß die Hydratation in einer Schicht vor sich geht, die dünner ist als die beim Rühren anhaftende Adsorptionsschicht, und daß die Geschwindigkeit der Hydratation maßgebend ist für die Kinetik des Vorgangs.

Bei der Abscheidung der As_2O_3-Kristalle, besonders aus salzsaurer Lösung, entsteht ein Luminescenzlicht (Triboluminescenz).

Die monokline Modifikation liegt in dem Mineral Claudetit vor und wird auch zuweilen in den Kondensationsanlagen der Hüttenwerke beobachtet; nach Pasteur soll sie bei langsamem Verdunsten von alkalischen Lösungen beobachtet werden, es entsteht dabei aber meist die reguläre Form. Die Dichte (4,00) ist größer als die der beiden anderen; die freie Energie scheint zwischen beiden zu stehen: die monokline Form ist bei gewöhnlicher Temperatur metastabil gegenüber der regulären; die Umwandlungswärme für amorph-monoklin ist kleiner als die für amorph-regulär, sie beträgt 2,52 Cal.

Alle Modifikationen können nur unter Druck geschmolzen werden. Der Dampf ist farb- und geruchlos; seine Dichte entspricht bis 1560° der Formel As_4O_6 (13,80 statt 13,74); bei 1800° sollen nur noch As_2O_3-Molekeln bestehen. Auch aus dem Fp. einer Nitrobenzollösung ergibt sich die Molekulargröße As_4O_6.

Chemisches Verhalten des As_4O_6. Arsentrioxyd wird durch Kohle und Wasserstoff bei höheren Temperaturen zu elementarem Arsen reduziert. Aus Lösungen wird durch phosphorige Säure und Zinnchlorür elementares Arsen gefällt, naszierender Wasserstoff reduziert zu AsH_3. In anderen Fällen wirkt dagegen As_4O_6 als Reduktionsmittel, so wird aus Goldlösungen elementares Gold abgeschieden, Salpetersäure wird in niedere Stickstoffoxyde, vor allem N_2O_3 übergeführt, wobei das Trioxyd in Arsensäure übergeht. — Chlor bildet bei höherer Temperatur $AsCl_3$; eine eigentümliche Umsetzung findet mit PCl_3 statt: $5As_2O_3 + 6PCl_3 = 4As + 6AsCl_3 + 3P_2O_5$ (bei 110 bis 130°).

Komplexverbindungen des As_4O_6. As_4O_6 bildet eine Reihe von Molekularverbindungen: $As_4O_6 . KCl$, $As_4O_6 . 8SO_3$, $As_4O_6 . 2As_2O_5 . 2H_2O$.

Arsenige Säure. Die wässerige Lösung des Trioxyds enthält eine schwache Säure, über deren Konstitution und Dissociation viele Untersuchungen vorliegen: aus diesen geht hervor, daß die arsenige Säure als einbasische Säure von der einfachen Formel mit einem As-Atom in der Molekel anzusehen ist; eine Entscheidung zwischen den beiden möglichen Formeln $HAsO_2$ und H_3AsO_3 konnte noch nicht getroffen werden, beide sind mit den bekannten Tatsachen vereinbar (für das Orthohydrat $As(OH)_3$ wird die Existenz von Estern der Formel $As(OR)_3$ angeführt; doch ist dieser Beweis nicht zwingend). Die Dissociation verläuft also entweder nach $HAsO_2 \rightleftarrows H^{\cdot} + AsO_2'$, oder nach $H_3AsO_3 \rightleftarrows H^{\cdot} + H_2AsO_3'$.

Daß die Molekel nur 1 Atom As enthält, geht aus den Beträgen der Lösungswärme hervor, wie sie einmal durch Berechnung und dann kalorimetrisch erhalten werden (s. o.), und außerdem aus verschiedenen Molekulargewichtsbestimmungen. Daß die Säure einbasisch ist, ergibt sich aus der Aenderung der Leitfähigkeit von Natriumarsenitlösungen mit der Verdünnung

d	NaH_2AsO_3	Natriumsalze einbasischer Säuren	Natriumsalze zweibasischer Säuren
$\lambda_{64} - \lambda_{32}$	3	3	4
$\lambda_{128} - \lambda_{64}$	3	3	5
$\lambda_{256} - \lambda_{128}$	2	2	4

Derselbe Schluß ergibt sich aus der Aenderung der Leitfähigkeit bei der Neutralisation von NaOH mit arseniger Säure: die Leitfähigkeit nimmt stetig ab, bis das Verhältnis H_3AsO_3:NaOH = 1:1 erreicht ist (Ersatz von OH′ durch das langsamer wandernde Arsenition). Die weitere geringe Abnahme erklärt sich durch Zurückdrängung der Hydrolyse durch Säureüberschuß.

Einen dritten Beweis liefert die Wärmetönung bei der Neutralisation mit Natronlauge; das Maximum entspricht der Bildung des Mononatriumarsenits. Die Steigerung bei Säureüberschuß läßt sich ebenfalls durch Verminderung der Hydrolyse erklären.

Mol As_2O_3 . . .	1	1	1	1
Mol NaOH . . .	1	2	4	6
Cal	73,0	137,8	150,7	155,8

Die arsenige Säure ist eine schwache Säure; sie wirkt wenig auf Lakmus und hat eine geringe Leitfähigkeit (Zawidzki):

v	16	64	256	1024
λ =	0,23	0,43	1,02	2,25
$10^9 \cdot$ k =	22	19	(27)	(32)

Später fand Wood folgende Werte für die Leitfähigkeit und die daraus berechneten Dissoziationskonstanten:

Konzentration	μ	k
0,195 -n	0,0553	$38,0 \cdot 10^{-10}$
0,086 -n	0,0654	$23,0 \cdot 10^{-10}$
0,0542-n	0,0756	$20,1 \cdot 10^{-10}$
0,0385-n	0,0824	$16,9 \cdot 10^{-10}$

Er berechnet einen Mittelwert $26,5 \times 10^{-10}$, der geringer ist als der von Zawidzki, aber immer noch größer als der aus der Verseifung von Methylacetat durch Natriumarsenit berechnete: $k = 6,3 \times 10^{-10}$.

Aus der molekularen Leitfähigkeit einer Natriumarsenitlösung (λ = 82,7,) ergibt sich für das Arsenition die Wanderungsgeschwindigkeit 43,5 und daraus für die Grenzleitfähigkeit der arsenigen Säure 368,5 (Berechnung von k).

Komplexe Arsenitionen. Außer dem Monoarsenition kommen auch Diarsenitionen und höhere Komplexe vor, besonders in den Lösungen der Arsenite.

Die Komplexe wurden von Auerbach wie folgt ermittelt: Wenn in Lösungen mit überüberschüssiger Säure die freie Säure von der Gesamtsäure abgezogen wird, so müßte der Rest, die gebundene Säure, bei Abwesenheit von Komplexbildung, zum Alkali (beide in Aequivalenten gerechnet) im Verhältnis 1:1 stehen. Die Abweichung ist ein Maß der Komplexität. Die Konzentration der freien Säure wurde durch Ausschütteln mit Amylalkohol nach dem Verteilungssatz bestimmt: A—a/Na (A gesamte Säure, a freie Säure, Na Natriumäquivalente) ist dann das Maß der Komplexität:

Komplexbildung in Arsenitlösungen (25°)

a	A − a	Na	$\frac{A-a}{Na}$	a_1'	a_2'	Ka
0,1982	0,0733	0,0484	1,51	0,0235	0,0249	0,19 ± 0,04
0,1336	0,0531	0,0411	1,29	0,0291	0,0120	0,32 ± 0,06
0,0858	0,1792	0,1484	1,21	0,1176	0,0308	0,33 ± 0,06
0,0668	0,0385	0,0345	1,12	0,0305	0,0040	(0,51 ± 0,14)
0,0316	0,0988	0,0950	1,03	0,0912	0,0938	(0,74 ± 0,23)

Nimmt man an, daß die Komplexbildung nach der Formel $AsO_2' + AsO_2H \rightleftarrows HAs_2O_4'$ vor sich geht, so erhält man:

$$K_a = \frac{a_1' \cdot a}{a_2'}$$

(a_1' = Konzentration der AsO_2'-Ionen, a_2' = Konzentration der Komplexionen, a = Konzentration der nichtdissoziierten Säure). Weiter hat man:

$$a_1' + a_2' = Na \quad \begin{cases} \text{einfache komplexe} \\ \text{Anionen = Kationen} \end{cases}$$

$$a_1' + 2a_2' = A - a \quad \begin{cases} \text{komplexe Ionen haben} \\ \text{doppeltes Säureäquivalent.} \end{cases}$$

hieraus:

$$\frac{a_1'}{a_2'} = \frac{2Na - (A - a)}{A - a - Na}$$

und hieraus:

$$K_a = a \cdot \frac{2Na - (A - a)}{A - a - Na}$$

Mit Hilfe dieser Formel kann man die Komplexbildung durch die Werte für freie und gebundene Säure ausdrücken.

Die „Konstante“ wächst mit der Abnahme der Komplexität; der Mittelwert beträgt 0,344 (vgl. die Tabelle). Man muß daher noch höhere Komplexe annehmen. — Die komplexe Säure ist erheblich stärker als die einfache.

Außer mit sich (Autokomplexbildung) bildet das Arsenition auch noch mit anderen (hydroxylhaltigen) Stoffen Komplexe, z. B. mit Mannit, und mit Metallarseniten, z. B. mit

Kupferarsenit: eine verdünnte kalte Kupferlösung wird durch eine alkalische Arsenitlösung nicht gefällt, es bildet sich vielmehr eine tiefblaue Lösung von Natriumcupriarsenit, für die die Formeln $Na_4[Cu(AsO_2)_6]$ oder $Na_2[Cu(AsO_2)_4]$ in Betracht kommen. Auch mit Cd und Ag werden solche Komplexe gebildet. Wie die komplexen reinen arsenigen Säuren sind auch diese gemischten Komplexsäuren stärker als die einfache arsenige Säure.

Arsenite. Die Salze der arsenigen Säure sind in Wasser sehr leicht löslich und kristallisieren schwer, besonders die Natriumsalze. Ein einziges, $KHAsO_4$, wurde von Pasteur durch Ueberschichten der wässerigen Lösung mit Alkohol kristallisiert erhalten. — Sehr interessant ist die Umsetzung der Alkaliarsenite mit Schwermetallsalzlösungen. Es entstehen dunkle Fällungen, die in ihrer Zusammensetzung nicht den Alkalisalzen entsprechen, sondern die Basis in höherem Aequivalentverhältnis enthalten, so daß die Lösungen stets sauer reagieren; da umgekehrt die Arsenite durch freie Säure gelöst werden, ist die Ausfällung unvollständig.

In diesen Verbindungen vermag die arsenige Säure sogar als 3-basische Säure aufzutreten; die Zusammensetzung ist abhängig von dem Verhältnis Säure : Alkali und wohl auch von der Konzentration: aus dem Salz $KHAs_2O_4$ erhält man mit Silbernitrat das „Orthosalz" Ag_3AsO_3, aus einer alkalischen Lösung, die dem Salz $K_2As_2O_4$ entspricht, entsteht dagegen $Ag_6As_7O_9$. Hieraus kann natürlich kein Schluß auf den Zustand der Stoffe in der Lösung gezogen werden: für die Ausscheidung sind nur die Löslichkeitsprodukte maßgebend.

Die Verhältnisse werden noch kompliziert durch die Adsorptionserscheinungen zwischen arseniger Säure und Metallhydroxyden (Gelen). Die Eigenschaft des frisch gefällten Eisenhydroxyds (Hydrogels) arsenige Säure zu binden, wurde von Bunsen entdeckt; die Adsorption ist so bedeutend, daß Eisenhydroxyd als Antidot bei Arsenikvergiftungen gegeben wird. — Es handelt sich hierbei nicht um chemische Bindung (Eisenarsenit), da das Eisenhydroxyd nur wirksam ist, solange es sich im Hydrogelzustand befindet. Biltz fand für die Verteilung der arsenigen Säure zwischen Hydroxyd und Lösung den Ausdruck: $g^5/x = c = 0.631$ (wobei g die adsorbierte Menge, x die in der Lösung gebliebene bezeichnet). Das Gleichgewicht ist von der Temperatur unabhängig, die Einstellung aber wird durch Erhöhung der Temperatur beschleunigt. Auch andere Hydrogele (z. B. $Mg(OH)_2$ und $Al(OH)_3$) geben, wenn auch schwächer, ähnliche Erscheinungen.

Gut charakterisierte Schwermetallsalze sind das Silbersalz Ag_3AsO_3 und das Bleisalz $Pb_3(AsO_3)_2$; die Erdalkalisalze haben Formeln wie $Ca_3As_4O_9$, $Sr_3As_4O_9$, $BaAs_2O_4$.

Uebergang von arseniger Säure (Arseniten) in Arsensäure (Arsenate). Die Beziehungen der beiden Oxydationsstufen werden entscheidend beeinflußt von der Reaktion der Lösung: in saurer Lösung wird die Oxydation begünstigt, in alkalischer die Reduktion. Indem man die Gleichgewichte $AsO_4''' \rightleftharpoons As^{\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot} + 4O''$ und $AsO_3''' \rightleftharpoons As^{\cdot\cdot\cdot} + 3O''$ mit der $H^{\cdot}$-Ionen-Konzentration in Verbindung setzt, erhält man für das As^V/As^{III}-Potential den Ausdruck:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + 0{,}02955 \log \frac{[H_3AsO_4][H^{\cdot}]^2}{[H_3AsO_3]}$$

ε_0 ist das Normal-Potential, das auftritt, wenn Arsensäure, arsenige Säure und $H^{\cdot}$-Ion in der Konzentration 1 vorhanden sind.

Aus Messungen von Abegg und Loimaranta an sauren As^V/As^{III}-Lösungen mit Zusatz von KJ als Potentialvermittler (vgl. den Artikel „Potential") ergab sich für ε_0 der Wert + 0,61 Volt (gegen die H_2-Elektrode). — Das Potential läßt sich aber auch durch Beziehung auf das Jodpotential $\frac{[J'_3]}{[J']^3}$ berechnen. Wenn sich Gleichgewicht eingestellt hat, kann das Arsenpotential dem Jodpotential gleichgesetzt werden, also:

$$\varepsilon_0 + 0{,}02955 \log \frac{[H_3AsO_4][H^{\cdot}]^2}{[H_3AsO_3]}$$

$$= 0{,}536 + 0{,}02955 \log \frac{[J'_3]}{[J']^3}$$

und hieraus

$$\varepsilon_0 = 0{,}536 - 0{,}02955 \log \frac{[H_3AsO_4][H^{\cdot}]^2[J']^3}{[H_3AsO_3][J'_3]}$$

Der Ausdruck, dessen Logarithmus genommen werden soll, hat den Wert 0,06 bis 0,08. Es ergibt sich

$$\varepsilon_0 = 0{,}570$$

Dieser Wert ist vorzuziehen. Man erkennt, daß unter den angegebenen Verhältnissen die Lösung oxydierend wirkt; alkalische Lösungen dagegen, Arsenitlösungen (die immer hydrolysiert sind), reduzieren. Sie oxydieren sich an der Luft, schlagen aus Silberlösungen freies Silber nieder, führen Cu^{II} in Cu^{I}, J in J'-Ion über (in saurer Lösung teilweise Umkehrung). — Von Neumann wurde das Potential einer Pt-Elektrode in Arsenitlösung zu — 0,23 gegen die H_2-Elektrode bestimmt, doch ist dieser Wert nicht definiert, da Angaben über die Konzentrationen der beiden Oxydationsstufen fehlen.

H_2S zerlegt Arsenitlösungen in Arsensulfür und Metallsulfid. Beim trockenen Erhitzen entsteht Arsenat und freies Arsen.

Derivate der arsenigen Säure. Ester und Estersäuren. — Durch Umsetzung von $AsCl_3$ mit Alkohol entsteht ein tertiärer Ester, der sogenannte symmetrische Arsenigsäuretriäthylester, $As(OC_2H_5)_3$.

Mit den primären Estern isomer sind die Monoalkylarsinsäuren, deren Natriumsalze durch Umsatz von Natriumarsenit mit Jodalkyl und deren Silbersalze durch Einwirkung von Silberoxyd und Wasser auf die Alkylarsendichloride $R.AsCl_2$ erhalten werden; die Zusammensetzung entspricht der Formel $R.AsO(OH)_2$.

Kakodylsäure $(CH_3)_2.AsO.OH$. Die Kakodylsäure ist das Analogon der Dimethylphosphinsäure. Sie entsteht bei der Oxydation des Kakodyloxyds (s. oben) mit HgO in Gegenwart von Wasser, sowie bei der langsamen Oxydation des Kakodyloxyds an der Luft; hierbei entsteht zunächst kakodylsaures Kakodyloxyd, das bei der Destillation mit Wasser in Oxyd und Säure zerfällt.

Kakodylsäure ist eine schwache Säure:

v =	8	16	32	64	128	256
λ_{25^0} =	0,61	0,87	1,31	1,98	2,97	4,44
$10^7 \cdot k$ =	3,71	3,86	4,28	4,90	5,53	6,19

Die Affinitätskonstante $k_s = 6,4 \times 10^{-7}$ ist von derselben Größenordnung wie die der Kohlensäure $3,2 \times 10^{-7}$ und die des Schwefelwasserstoffs $1,3 \times 10^{-7}$; sie ist ca. 20-mal größer als die der arsenigen Säure $k = 0,21 \times 10^{-7}$.

Die Hydrolyse des Natriumsalzes ist äußerst gering (wie bei $NaHCO_3$) Phenolphtalein wird nicht gerötet; in $^1/_{10}$ n-Lösung ist die Hydrolyse höchstens 0,05%.

Die Kakodylsäure vermag aber auch als schwache Base zu reagieren (amphotere Verbindung). Die Stärke als Base (k_b) wurde durch Bestimmung der Hydrolyse des Kakodylsäurechlorhydrats und durch Messung der Beschleunigung des Rotationsrückgangs der Glucose und der Laktose ermittelt. Es ergab sich (Zawidzki):

1. Aus der Hydrolyse bei 0° . . . . $k_b = 4,15 \times 10^{-14}$
2. „ „ „ „ 25° . . . . $k_b = 4,05 \times 10^{-13}$
3. „ „ Rotationsabnahme der Glucose bei 25° $k_b = 2,63 \times 10^{-13}$
4. „ „ „ „ Laktose „ „ $k_b \begin{Bmatrix} 1,14 \\ 1,35 \end{Bmatrix} \times 10^{-13}$

Johnston nimmt für k_b $3,8 \times 10^{-13}$ an. Die Base ist erheblich stärker als die Oxoniumbase Dimethylpyron $(2,7 \times 10^{-14})$.

Nach Hantzsch hat man ein Gleichgewicht:



$$(CH_3)_2AsO_2H \rightleftharpoons (CH_3)_2As(OH)_3$$
Kakodyl„säure" Kakodyl„base"

Halogenderivate. Im Gegensatz zu den Phosphorsäuren, bei denen eine Reihe von wohldefinierten Derivaten, wie Chloride, Amide u. a. bekannt sind, liegen bei der arsenigen Säure nur wenige Angaben über einige Oxyhalogenide vor und es ist zudem noch unsicher, ob es sich dabei um Verbindungen oder Gemische handelt.

Arsenoxychlorid. $AsCl_3$ löst beim Erwärmen reichlich As_2O_3 auf; der Rückstand beim Abdestillieren des überschüssigen $AsCl_3$ wird als Oxychlorid angesehen.

δ) Schwefelverbindungen des As^{III}. — Arsentrisulfid. Das Mineral Auripigment ist Trisulfid; es ist eine gelbe blättrig-kristalline Masse von der Dichte 3,46, die leicht schmilzt und dann zu einer roten Masse vom spezifischen Gewicht 2,76 erstarrt. — Das As_2S_3 wird auf trockenem und nassem Wege erhalten, durch Zusammenschmelzen von Arsen und Schwefel und durch Fällung aus Lösungen mit H_2S. Das in der Technik durch Zusammenschmelzen von As_2O_3 und Schwefel erhaltene Operment oder gelbe Arsenglas besteht hauptsächlich aus As_2O_3 und enthält nur wenig As_2S_3.

Das durch H_2S gefällte Trisulfid ist amorph; durch längeres Erhitzen mit Na_2CO_3 auf 70 bis 80° wird es kristallin.

As_2S_3 verflüchtigt sich bei ca. 700° unzersetzt (bei 1000° Dissoziation).

Frisch gefälltes Arsentrisulfid löst sich mit gelber Farbe in großen Mengen in reinem Wasser; wenn man H_2S in eine wässerige (nicht angesäuerte) Lösung von As_2O_3 leitet, so findet keine Fällung statt, obwohl die Umsetzung vollständig ist, sondern nur Gelbfärbung. Die Lösung ist eine kolloidale, der Siedepunkt liegt selbst bei hohen Konzentrationen nicht höher als der des reinen Wassers. Eigentliche Lösungen von As_2S_3 (aus As_2O_3-Lösung mit H_2S gefällt) enthalten nach Biltz $2,1 \times 10^{-6}$ Mol/Liter bei 18°; die spezifische Leitfähigkeit dieser Lösung beträgt $3,263 \times 10^{-6}$ und hieraus berechnet sich unter Annahme quantitativer Hydrolyse für das $As^{\cdots}$-Ion ($^1/_3$) die Wanderungsgeschwindigkeit 85. Aus den kolloidalen Lösungen kann das Sulfid entweder durch Aussalzen oder durch Ausfrieren oder Eindampfen erhalten werden. Bei der Fällung durch Elektrolyte erhält man gelbe Hydrogelabscheidungen, die immer Einschlüsse des Fällungsmittels enthalten; durch Auswaschen lassen sich diese nicht entfernen. Beim Ausfrieren oder Eindampfen entstehen rote Produkte, die bei 100° sintern und amorphe Massen von muschligem Bruch bilden und bei weiterem Erhitzen auf 150 bis 160° gelb werden; auch die gelben Hydrogele gehen

bei 100° in die rote Form über. Das rote Arsensulfid, auch das durch Ausfrieren erhaltene, vermag keine kolloidale Lösung mehr zu bilden (vgl. Abschnitt 11).

Arsentrisulfid ist gegen chemische Einwirkung z. T. sehr beständig: konzentrierte HCl zerlegt erst bei anhaltendem Kochen in H_2S und As_2O_3; konzentrierte H_2SO_4 und $KHSO_4$ führen in As_2O_3 und SO_2 über; rauchende Salpetersäure oxydiert sehr heftig. Wasserstoff und Kohlenstoff reduzieren bei höherer Temperatur zu elementarem Arsen; Cyankalium gibt elementares Arsen und Rhodankalium; Metalle liefern ein Gemisch von Arsenid und Metallsulfid. — In Alkalisulfiden, -hydroxyden, in Ammoniak und Ammonkarbonat löst sich As_2S_3 zu Sulfarseniten, Arseniten und Sulfoxyarseniten.

Sulfarsenite. Thioarsenite. Die Alkalisalze der sulfarsenigen Säure entstehen, wie eben erwähnt wurde, beim Auflösen des As_2S_3 in Alkalisulfiden und -hydroxyden. Die freie Säure ist nicht bekannt, sie zerfällt in Trisulfid und H_2S. Ueber den Zustand der Lösungen (Komplexität) ist nichts bekannt.

Mit Schwermetallsalzlösungen entstehen gefärbte Niederschläge. Andere Darstellungsmethoden für Schwermetallarsenite sind: das Zusammenschmelzen von As_2S_3 mit Metallchloriden (z. B. Proustit aus AgCl und As_2S_3) oder die Reduktion von Sulfarseniaten mit KCN (z. B. wieder Proustit nach der Formel: $Ag_3AsS_4 + KCN = Ag_3AsS_3 + KCNS$).

Arsensulfhalogenide. $As_4S_5Cl_2$ entsteht, wenn man bei gewöhnlicher Temperatur in $AsCl_3$ Schwefelwasserstoff einleitet. Die Verbindung schmilzt bei 120°, heißes Wasser zerlegt in Sulfür und Chlorür. —

Arsenselenide. As_2S_3 entsteht aus $AsCl_3$ durch Einleiten von Selenwasserstoff oder durch Zusammenschmelzen der Elemente. — Auch gemischte Schwefel- und Selenverbindungen des Arsens sind bekannt.

8c) As^V-Verbindungen. — *α*) Verbindungen mit den Halogenen. Arsenpentafluorid AsF_5. — AsF_5 wurde von Moissan durch Einwirkung von Fluor auf flüssiges AsF_3 in kleinen Mengen erhalten. Ruff erhielt es nach der Gleichung: $2SbF_5 + AsF_3 + Br_2 = 2SbF_4Br + AsF_5$. AsF_5 ist ein farbloses Gas, das bei —53° sich zu einer schwach gelblichen Flüssigkeit verdichtet und bei —80° zu einer weißen Masse erstarrt. Es löst sich in Wasser und Alkali, an feuchter Luft bildet es weiße Nebel. Die Dampfdichte ist geringer als der Formel entspricht (132,6 statt 170,25).

Glas, Metalle, (Zn, Bi, besonders Pb und Hg) und organische Stoffe werden von AsF_5 angegriffen.

AsF_5 bildet eine Reihe Additionsverbindungen. Zunächst die Doppelverbindungen mit Kaliumfluorid: sie sind sehr löslich und schwer zur Kristallisation zu bringen: in trockenem Zustand sind sie ziemlich beständig, in Lösung tritt Hydrolyse unter Bildung von HF und Oxyfluoriden ein; die Komplexe scheinen sehr beständig zu sein, da H_2S nur langsam fällt.

$2AsF_5.2KF.H_2O$ entsteht beim Lösen von Kaliumarsenat in einem Ueberschuß von Fluorwasserstoff; kleine rhombische Kristalle; andere Verbindungen sind: $AsF_5.2KF.H_2O$; $AsOF_3.AsF_5.KF.3H_2O$.

Weiter ist von Interesse die von Ruff entdeckte Verbindung mit Nitrosylfluorid (NOF); sie wurde beobachtet bei der Darstellung von NOF aus AgF und NOCl, als zur Beschleunigung der Reaktion AsF_3 zugesetzt wurde. $AsF_5.NOF$ ist eine weiße zerfließliche und zersetzliche (NO_2) kristalline Masse, an trockener Luft ist die Verbindung beständig. Gegenüber den reinen Komponenten zeigt $AsF_5.NOF$ große Reaktionsträgheit. Die Verbindung ist für die Valenzlehre von Bedeutung (s. S. 595 und 606).

Arsenpentachlorid $AsCl_5$. Die Neigung zur Bildung von Pentahalogeniden ist beim Arsen gering (s. S. 579). Lange Zeit gelang es nicht, $AsCl_5$ darzustellen, weil bei zu hoher Temperatur gearbeitet wurde. Endlich erhielten Baskerville und Benett die Verbindung, indem sie Chlor in mit fester CO_2 gekühltes $AsCl_3$ einleiteten: Das feste $AsCl_3$ (Fp. —18°) ging dabei in eine grünliche Flüssigkeit über; durch Erwärmen auf —31° wurde das überschüssige Chlor abdestilliert; die zurückbleibende Flüssigkeit hatte die Zusammensetung $AsCl_5$, sie erstarrte bei —38 bis —40°; bei —28° trat schon merkliche Zersetzung ein.

Die Verbindung ist in CS_2 und Aether löslich und kristallisiert aus diesem in gelben Prismen; an feuchter Luft entwickelt sie Salzsäuredämpfe. $AsCl_5$ ist ein äußerst instabiler Stoff; die organischen Derivate sind beständiger.

Arsenpentajodid. Ein Arsenpentajodid existiert nicht, wie die thermische Analyse zeigt, doch gibt es ein Eutektikum von ähnlicher Zusammensetzung (mit 71,5% Jod). Im System As-J existieren nur zwei Verbindungen: As_2J_4, das bei 135,5° in zwei Schmelzen zerfällt und AsJ_3, das bei 140,7° schmilzt; außerdem 3 Eutektika.

β) Verbindungen des As^V mit Sauerstoff. — Arsenpentoxyd As_2O_5. As_2O_5 entsteht beim Entwässern von Arsensäure (bei schwacher Rotglut); Verbrennen von Arsen führt nur zu Trioxyd, nicht wie beim Phosphor zum Pentoxyd. As_2O_5 ist eine weiße amorphe Masse, die bei höherer Temperatur zu einem Glas schmilzt; d=4,086. Beim Verdampfen dissoziiert das As_2O_5 fast völlig in As_2O_3 und Sauerstoff; aus diesem Grund und weil auch kein Lösungsmittel bekannt ist, in welchem sich As_2O_5 unver-

ändert löst, läßt sich das Molekulargewicht nicht bestimmen.

Reduktion führt zu As_2O_3 oder zu elementarem Arsen, Metalle bilden weiter Arsenide, mit Salzsäure wird Trichlorid und freies Chlor gebildet; H_2S gibt Pentasulfid; mit Wasser zerfließt As_2O_5 zu Arsensäure.

Arsensäure. Arsensäure erhält man durch Oxydation von As_2O_3 oder von elementarem Arsen mit konzentrierter Salpetersäure. Aus der sirupösen Lösung der Arsensäure scheiden sich meist nur kleine, zuweilen aber auch große, farblose, prismatische oder tafelförmige Kristalle des Hydrats $2H_3AsO_4 . H_2O$ aus; diese Verbindung ist sehr hygroskopisch.

Das Hydrat schmilzt zunächst in seinem Kristallwasser und geht dann bei 100° in die wasserfreie Säure über; bei 140 bis 180° bildet sich Pyroarsensäure ($H_4As_2O_7$; harte glänzende Kristalle), die sich mit starker Wärmeentwickelung in Wasser löst und sich wieder hydratisiert; bei 200° geht die Pyro- in Metasäure über und diese gibt schließlich As_2O_5.

Alle wasserärmeren Verbindungen lösen sich zu Arsensäure, die Pyro- und die Metasäure sind in Lösung nicht bekannt; die Löslichkeit in Wasser ist sehr groß, auch Glycerin soll etwas lösen.

Die verdünnten Lösungen reagieren kräftig sauer und lösen Eisen und Zink unter H_2-Entwickelung; AsH_3 wird hierbei nicht entwickelt (man muß HCl oder H_2SO_4 zusetzen).

Die Stärke der Arsensäure ergibt sich aus der elektrischen Leitfähigkeit:

v	8	32	128	512	1024
λ	73,1	215,5	201,4	282,6	310,4

Die Säure ist demnach etwas schwächer als die Phosphorsäure; dies geht auch aus der Beschleunigung der Zuckerinversion hervor (HCl = 100):

	Elektrische Leitfähigkeit der Normallösung	Zucker-Inversion
Arsensäure	5,38	4,81
Phosphorsäure	7,27	6,21

Auch die Neutralisationswärme weist darauf hin, daß die Dissoziation nicht groß ist, sie beträgt 35,9 Cal.

Die Dissoziation beschränkt sich fast ganz auf die 1. Stufe (Ionen H_2AsO_4').

Chemisches Verhalten. Arsensäure ist ein Oxydationsmittel, sie wurde früher in der Technik, bei der Fabrikation der Anilinfarben, verwendet. Aus konzentrierter Salzsäure wird Chlor entwickelt, andererseits erhält man durch Einleiten von Chlor in eine $AsCl_3$-Lösung Arsensäure: es liegen Gleichgewichte vor, je nach den Verhältnissen verläuft die Reaktion im einen oder anderen Sinn. Mit H_2S entsteht As_2S_5, As_2S_3 und Schwefel (s. u.). Stärkere Reduktionsmittel führen in elementares Arsen und AsH_3 über.

Salze. Die Arsensäure bildet 3 Reihen von Salzen: die primären reagieren sauer, die sekundären und tertiären alkalisch. Hierin, in den Löslichkeitsverhältnissen, in den Kristallformen (Isomorphismus), sowie in den Komplexbildungen mit Molybdän- und Wolframsäure besteht eine große Uebereinstimmung mit den Phosphaten.

Von den Salzen ist das Magnesiumammoniumarseniat für die Analyse von Bedeutung. — Durch Zusammenschmelzen von Alkaliarseniaten mit Metalloxyden und Karbonaten entstehen Doppelsalze. — Auch Ester sind bekannt. Der Triäthylester entsteht aus Silberarseniat und C_2H_5J (Kp. 235°).

γ) Verbindungen des As^V mit Schwefel. Arsenpentasulfid As_2S_5. As_2S_5 wird am besten durch Zusammenschmelzen der Elemente im geeigneten Verhältnis erhalten. Aus Arsensäurelösungen wird As_2S_5 durch H_2S unter bestimmten Bedingungen rein erhalten — nach Bunsen aus schwach salzsauren Lösungen bei 72° (quantitative Analyse). Bei gewöhnlicher Temperatur erfolgt zunächst keine Fällung (kolloidale Lösung), dann fällt ein Gemisch von As_2S_3, As_2S_5 und Schwefel. Auch bei gewöhnlicher Temperatur (15°) kann aber reines As_2S_5 erhalten werden, wenn die Konzentration der Salzsäure richtig gewählt wird. Usher und Travers fanden bei einer As_2O_5-Konzentration von 0,3664% folgende Abhängigkeit vom Säuregehalt:

% Salzsäure	Niederschlag	
1,8	As_2S_5	91%
7,9	„	rein
14,34	„	„
25,10	„	58%
32,27	As_2S_3	rein

Es ist also ein mittlerer Bezirk der Säurekonzentration vorhanden, der für die Entstehung von reinem As_2S_5 am günstigsten ist. — Dieselbe Erscheinung eines Optimums zeigt Arsensäure auch gegenüber SO_2; Lösungen, die mit 20% HCl versetzt sind, zeigen langsamere Reduktion als solche mit 5 oder 32% Säure. Eine Erklärung dieses Verhaltens liegt noch nicht vor.

Nach MacCay geht die Bildung des Pentasulfids — über die verschiedenen Sulfarsensäuren (H_3AsSO_3 usw.), bis schließlich die H_3AsS_4 in Pentasulfid und H_2S zerfällt.

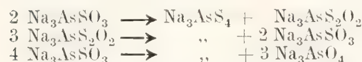
As_2S_5 ist gelb gefärbt (heller als As_2S_3); es kann geschmolzen werden, der Dampf ist wahrscheinlich schon bei 500° in As_2S_3 und Schwefel zerfallen. In Alkalisulfiden, Alkalien und Ammoniak löst sich das As_2S_5 zu Sulfarseniaten und Sulfoxyarseniaten.

Sulfarsensäure oder Thioarsensäure. Die freie Säure ist nicht bekannt, dagegen eine Reihe von Salzen. Die Alkalisalze entstehen aus As_2S_5 und Alkalisulfid oder aus As_2S_3 und Alkalipolysulfid. Neben

Sulfoxyarseniaten entstehen sie beim Lösen von As_2S_5 in Alkalilaugen, bei der Einwirkung von H_2S auf arsensaure Salze, beim Schmelzen von Pentasulfid mit Alkalihydroxyd oder -karbonat. — Man kennt Ortho-, Pyro- und Metasalze. — Mit Schwermetallsalzlösungen entstehen schwerlösliche farbige Niederschläge der Metallarseniate.

Sulfoxyarseniate. Man kennt Salze der Säuren M_3AsSO_3, $M_3AsS_2O_2$, M_3AsSO_3, außerdem noch einige kompliziertere Verbindungen. Die Bildung bei der Einwirkung von H_2S auf Arseniate wurde schon erwähnt. Weiter entstehen Sulfoxyarseniate beim Kochen von Arsenit mit Schwefel, bei der Behandlung eines Gemisches von As_2O_3 und As_2S_3 mit Kaliumpolysulfid, bei der Einwirkung von Alkalien auf As_2S_5. Die Löslichkeit nimmt bei den Barium- und Strontiumsalzen mit steigendem S-Gehalt zu (Trennung).

Auch mit Magnesiumhydroxyd entsteht bei höherer Temperatur nicht das Trisulfoxyarseniat, sondern bei 70° das Di-Salz, bei noch höherer Temperatur das Mono-Salz. Ueberhaupt werden bei den Reaktionen, bei denen Trioxysulfarseniate entstehen, immer auch alle anderen Salze gebildet nach den Gleichungen:



$$2\ Na_3AsSO_3 \longrightarrow Na_3AsS_4 + Na_3AsS_2O_2$$
$$3\ Na_3AsS_2O_2 \longrightarrow \text{,,} + 2\ Na_3AsSO_3$$
$$4\ Na_3AsSO_3 \longrightarrow \text{,,} + 3\ Na_3AsO_4$$

Welches Salz als Hauptprodukt entsteht, hängt von den besonderen Bedingungen ab.

Endlich entstehen auch noch aus As_2O_3 und Schwefelnatrium Sulfarsenate. Je nach den Mischungsverhältnissen bilden sich alle möglichen Produkte: Natriumarsenat, -sulfarsenat, sämtliche Sulfoxyarsenate, als Nebenprodukt elementares Arsen, Arsendisulfid und ein Salz $Na_8As_{18}S_{24}O_7 . 30 . H_2O$.

Arsenpentaselenid As_2Se_5. Arsenpentaselenid ist erst in neuerer Zeit dargestellt worden. Es entsteht durch Zusammenschmelzen der Elemente oder durch Zersetzung der Selenoarseniate. Das Zusammenschmelzen geschieht in einer Stickstoffatmosphäre bei 400°; das Produkt enthält neben As_2S_5 elementares Selen, die Trennung erfolgt durch Vacuumdestillation; Kristallisation konnte bisher noch nicht erreicht werden. Aus der Lösung des Kaliumoxyselenoarseniats fällt das Pentaselenid als rotbraune Masse. — As_2Se_5 ist fast in allen indifferenten Lösungsmitteln (Wasser, Alkohol, Aether, CS_2) unlöslich;

Konzentrierte Säuren zersetzen langsam (rauchende HNO_3 oxydiert rasch zu seleniger und Arsensäure). Alkalien, auch Ammoniak, lösen mit gelbgrüner Farbe, aus diesen Lösungen fällt das As_2Se_5 beim Ansäuern unverändert wieder aus, ebenso scheidet es sich aus heißgesättigten Karbonatlösungen beim Erkalten wieder aus. Bei 700 bis 800° verdampft As_2Se_5 unter Zersetzung: die Dampfdichte ist bei dieser Temperatur 9,531 bis 9,652 statt 18,84 für As_2Se_5, bei 1050 bis 1100° sogar nur 6,16 bis 6,27.

Auch Selenoarsensäuren, Selenooxyarsensäuren sind bekannt; sodann gemischte Schwefel- und Selenverbindungen.

8d) Verbindungen mit unbestimmter Wertigkeit des Arsens. — Arsenphosphid AsP. Die Verbindung wird durch Einleiten von AsH_3 in PCl_3 oder durch Einwirkung von PH_3 auf $AsCl_3$ als ein rotbraunes Pulver erhalten, das beim Erhitzen unter Luftabschluß in As und P zerfällt, an der Luft zu P_2O_5 und As_2O_3 verbrennt, in den meisten organischen Lösungsmitteln unlöslich, in CS_2 etwas löslich ist. Gegen Säuren ist die Substanz ziemlich beständig; konzentrierte Salpetersäure verbrennt zu Phosphorsäure und Arsensäure; mit Alkalien entstehen schon bei gewöhnlicher Temperatur PH_3, AsH_3, H_3PO_3, $HAsO_2$, Arsen. — Ueber die Molekulargröße und die Valenz ist nichts bekannt.

Tetraarsentrisulfid As_4S_3. Entsteht durch Zusammenschmelzen von As_4S_4 mit Arsen und Destillation im Vacuum; in Benzol und CS_2 ist es etwas löslich und wird daraus in gelben rhombischen Kristallen erhalten. Die Lösung ist bei Luftabschluß beständig, bei Zutritt von Luft entsteht As_2S_3 und As_2O_3. As_4S_3 verdampft im Vacuum unter 200° merklich und schmilzt etwas höher; die Dampfdichte ist bei 792° 8,204, bei ca. 1000° 6,588, während sich für As_4S_3 13,69 ergibt.

9. Thermochemie. Die Wärmetönungen beziehen sich auf die Bildung aus den Elementen (* kristallisiertes Arsen):

As_2O_3	(fest)	154,67	Cal.
As_2O_5	(,,)	219,38	,,
H_3AsO_4	(,,)	215,63	,,
AsH_3	(gasförmig)	44,2*	,,
AsF_3			
$AsCl_3$	(flüssig)	71,39	,,
$AsBr_3$	(fest)	45,5	,,
AsJ_3	(,,)	13,5	,,

10. Photochemie. Starke Linien liegen im Funkenspektrum bei 5652, 5559, 4037, 3923; im Bogenspektrum bei 2861, 2780; im Vakuumrohrspektrum bei 5652 und 5559 A.-E.

11. Kolloidchemie. Das Metall wurde von The Svedberg durch elektrische Zerstäubung unter Isobutylalkohol als wenig haltbares, braunrot durchscheinendes Sol gewonnen. — Eine kolloidale Lösung ist auch die des gelben As in CS_2. — Den wichtigsten Beitrag zur Kolloidchemie

liefert das As_2S_3: die Untersuchungen über das As_2S_3-Hydrosol waren von großer Bedeutung für die Erkenntnis der Hydrosole überhaupt. Das Hydrosol ist eine gelbe bis gelbrote, im durchfallenden Licht klare, im auffallenden opalisierende Flüssigkeit; die Färbekraft ist so bedeutend, daß Lösungen 1:10^6 in dicker Schicht noch Gelbfärbung und Opaleszenz zeigen; das Absorptionsspektrum zeigt Auslöschung des Violett und Blau. Es lassen sich Lösungen von beinahe 40% As_2S_3 herstellen mit allen Uebergängen bis zur optisch fast leeren Lösung: Präparate, die bei 1000-facher Vergrößerung Einzelteile erkennen lassen und gegen reines Wasser nicht diffundieren und andere, die unter dem Mikroskop keine Inhomogenität zeigen, diffundieren und durch poröse Tonfilter unverändert hindurchgehen. Der Verteilungszustand ist von den Umständen der Fällung abhängig und wird durch nachfolgende Verdünnung nicht beeinflußt. Ueber Elektrolytwirkung vgl. den Artikel „Disperse Systeme". Die Hydrosole sind ziemlich beständig: überschüssiger H_2S kann weggekocht werden, ohne daß Gelbildung eintritt; ob die letzten Spuren entfernt werden können, ohne daß Zersetzung eintritt, ist noch zweifelhaft.

Literatur. *Siehe beim Antimon.*

A. Stirm.

γ) Antimon.

Sb. Atomgewicht 120,0.

1. Atomgewicht. 2. Geschichte. 3. Vorkommen, 4. Gewinnung und Verwendung. 5. Allgemeine Charakteristik des Elements. 6. Formarten und allotrope Modifikationen. 7. Analytische Chemie. 8. Spezielle Chemie. 9. Thermochemie. 10. Photochemie. 11. Kolloidchemie.

1. Atomgewicht. Von der Atomgewichtskommission ist 1913 für das Antimon der Wert 120,0 festgesetzt worden. Diese Zahl ist in Uebereinstimmung mit dem Gesetz von Avogadro, mit der Regel von Dulong und Petit, mit der Lehre vom Isomorphismus, schließlich mit dem periodischen Gesetz: alle Eigenschaften des Antimons sind so, wie sie sich für ein Element vom Atomgewicht 120 nach der periodischen Gesetzmäßigkeit erwarten lassen.

2. Geschichte. Metallisches Antimon scheint schon im Altertum bekannt gewesen zu sein: in Südbabylonien wurde das Bruchstück einer Vase ausgegraben, das nahezu aus reinem Sb besteht; auch den Chinesen war es seit alten Zeiten bekannt („Brechkelch"). Im Mittelalter findet sich Antimon in den Schriften von Abu Mansur (10. Jahrhundert) erwähnt eine Vorschrift zur Herstellung von Antimonlegierungen findet sich in dem Buch „Liber sacerdotum" (Zeit der Kreuzzüge), im „Triumphwagen des Antimonii" des Pseudo-Basilius (16. Jahrhundert) ist eine ausführliche Beschreibung der Antimondarstellung aus Schwefelantimon durch Schmelzen mit Eisen oder verschiedenen Salzen gegeben. Die Abweichungen des Antimons vom Metallcharakter waren dem Basilius bekannt, er betrachtet es als eine Metallabart (Metallbastard). Schon damals wurde Antimon zu Legierungen für Glocken, Spiegel, Lettern verwendet. — Viel verwendet wurde im Altertum das Antimonsulfid, der Spießglanz, als Kosmetikum, zum Schminken der Augenbrauen. Er wird im Alten Testament erwähnt, Dioskorides nennt ihn *στιμμι*, Plinius stibium, der Name „Antimon" tritt bei Pseudo-Geber auf.

Eine große Rolle spielten Antimonpräparate vom Zeitalter der Jatrochemie bis gegen Ende des 18. Jahrhunderts. Schon Pseudo-Basilius gibt im „Triumphwagen" Vorschriften zur Darstellung von Antimonbutter (Trichlorid), Algarotpulver (basisches Chlorid), Antimonoxyd und antimonsaurem Kalium; es ist zweifellos, daß diese Präparate medizinische Verwendung fanden, doch scheint man sich über die Zusammensetzung nicht klar gewesen zu sein.

3. Vorkommen. Antimon gehört wie das Arsen zu den Elementen, die sich nicht wesentlich an der Zusammensetzung der Erdrinde beteiligen. Es kommt gediegen vor, aber ziemlich selten; in neuerer Zeit sind reiche Lager in Queensland und Neu-Süd-Wales gefunden worden. Häufiger sind Verbindungen, die wichtigste ist das Grauspießglanzerz, der Antimonit (Sb_2S_3). Andere Erze sind: Antimonblende Sb_2S_2O, Senarmontit Sb_2O_4, Antimonblüte (Weißspießglanzerz) Sb_2O_3, und eine Reihe von Doppelverbindungen des Antimonsulfids mit Metallsulfiden.

4. Gewinnung und Verwendung. Das weitaus wichtigste Ausgangsmaterial für die Antimongewinnung ist der Grauspießglanz (Sb_2S_3), außerdem kommen zur Verwendung einige andere Erze und Hüttenprodukte wie Fahlerzspeisen und Bleiabstriche (Bleiantimonat).

Aus dem Spießglanz wird das „Antimonium crudum" ausgesaigert und dann in der „Niederschlagsarbeit" durch Eisen zersetzt; oder man röstet ab und reduziert die Oxyde mit Kohle unter Zusatz von Soda und Natriumsulfat. Das 93 bis 94%-ige Rohantimon wird mit oxydierenden (MnO_2, Sb_2O_4) und hauptsächlich mit sulfurierenden (Sb_2S_3) Zusätzen geschmolzen, wobei die fremden Metalle (Cu, Fe) und das Arsen in die Schlacke gehen. Das bleifreie, reine Antimon zeigt eine strahlig-kristallinische Oberfläche (Antimonstern). — Armen Erzen oder Saigerrückständen entzieht man das Sb mit HCl oder Alkalisulfid

und fällt dann in geeigneter Weise. — Fahlerze werden „chlorierend geröstet", d. h. mit HCl bei 250 bis 400° behandelt, wobei $SbCl_3$ sich verflüchtigt, in NaCl-Lösung aufgefangen und mit Eisen zersetzt wird (allgemeines Verfahren zur Trennung). — Weniger zur Darstellung als zur Raffination benützt man elektrolytische Verfahren (Sulfantimonit- und Sulfantimonatlösungen); Betts gewinnt das bei der Cu-Raffination im Schlamm zurückbleibende Antimon aus SbF_3-Lösung in einer Reinheit von 99,5%.

Verwendung. Antimon findet hauptsächlich Verwendung für Legierungen; die wichtigste ist die mit Blei (Hartblei), die vor allem als Letternmetall verwendet wird; die Legierung mit Zinn ist das Britanniametall; Schwefelantimon wird in der Feuerwerkerei benutzt und zum Vulkanisieren von Kautschuk; in der Färberei stellt man Beizen mit Brechweinstein oder mit Antimondoppelsalzen (Fluoriden, Oxalaten) her; endlich werden noch (aber in abnehmendem Maße) Antimonverbindungen als pharmazeutische Präparate verwendet (als Brechmittel, gegen Hautkrankheiten).

5. Allgemeiner physikalischer und chemischer Charakter des Elements. Valenz. Elektroaffinität. Das Atomgewicht 120 bringt das Antinom in die 5. Vertikalreihe des periodischen Systems in die Nachbarschaft von Arsen und Wismut (vertikal) und von Zinn und Tellur (horizontal). Aus dieser Stellung lassen sich auf die Eigenschaften etwa folgende Schlüsse ziehen:

5a) Allgemeiner physikalischer und chemischer Charakter: Immer noch auf der Grenze zwischen Metall und Metalloid, doch tritt gegenüber Arsen infolge des höheren Atomgewichts der metallische Charakter stärker hervor. In den Verbindungen kommt die „Mittelständigkeit" zum Ausdruck (Hydrolyse; metallischer Charakter und Legierungsfähigkeit).

Bestätigung: Antimon bildet eine gasförmige Wasserstoffyerbindung, die Oxyde sind Säureanhydride; andererseits aber bildet es auch als Base Salze, allerdings meist basische (Salze des „Antimonyls"); neben metalloiden Modifikationen existiert eine metallische, die zudem die stabile ist. Alle Verbindungen nach links und rechts (Halogenide und Alkaliantimonide) haben keinen eigentlichen Salzcharakter, sie werden stark durch Wasser zersetzt (SbH_3 aus Alkaliantimonid) oder sie haben metallischen Charakter und Legierungsfähigkeit (Schwermetallantimonide und Schwefelantimon).

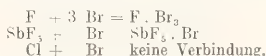
5b) Valenz: Antimon tritt hauptsächlich 3- und 5-wertig auf (Maximalvalenz): dreiwertig ist es gegen Wasserstoff (negative Valenz; nach Abegg „Normalvalenz), fünfwertig gegen Sauerstoff und die Halogene (positive Valenz; Kontravalenz). Das hohe Atomgewicht läßt eine größere Neigung, in den 5-wertigen Zustand überzugehen, erwarten. Die Verhältnisse bei den Ionen s. unten S. 596.

Bestätigung: Die höchste H-Verbindung des Antimons ist SbH_3, die höchste O-Verbindung Sb_2O_5, die höchsten Halogenverbindungen $SbCl_5$ usw. — Für die 5-Wertigkeit können besonders das unzersetzt siedende SbF_5, die Antimonsäure und ihre Salze und die Stiboniumverbindungen als Belege angeführt werden. Die Neigung in den 5-wertigen Zustand überzugehen, zeigt sich in der Heftigkeit, mit der Sb in Chlor zu $SbCl_5$ verbrennt, während die Darstellung von $AsCl_5$ sehr schwierig ist (Zersetzung bei —28°).

Durch Alkylierung wird die Tendenz nach der höheren Valenzstufe wie immer gesteigert: Addition von Sauerstoff, Schwefel, Chlor durch die Trialkylstibine, Zersetzung von HCl unter Bildung des stark dissoziierten Salzes $[Sb(R)_3]Cl_2$: der Komplex $[Sb(R_3)]^{II}$ verhält sich völlig wie ein stark positives 2-wertiges Metall.

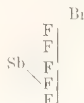
Für vierwertiges Antimon spricht die Verbindung $SbCl_4$, die allerdings noch nicht isoliert werden konnte, die aber in Doppelverbindungen bekannt ist: $SbCl_4 . 2RbCl$ u. a.; diese Verbindungen entsprechen den Platin- und Zinnverbindungen $PtCl_6Me_2$ und $SnCl_6Me_2$. Vielleicht ist das Sb auch in dem Oxyd Sb_2O_4 und den entsprechenden Salzen 4-wertig.

Bei den Salzen $SbCl_6Me_2$ befindet man sich bereits auf dem umstrittenen Gebiet der „Molekularverbindungen". Das Sb liefert noch einige Beispiele von großer Bedeutung für diese Klasse von Verbindungen: so vermag, wie Ruff entdeckte, das SbF_5 Brom zu addieren und die Verbindung $SbF_5 . Br$ zu bilden, und zwar ist die Bindung eine ziemlich feste; es drängt sich die Analogie auf mit den Verbindungen, die die Halogene unter einander bilden, Ruff stellt die Reihe auf:



$$\begin{array}{lll} F & + 3\ Br = & F . Br_3 \\ SbF_5 & + \quad Br & SbF_5 . Br \\ Cl & + \quad Br & \text{keine Verbindung.} \end{array}$$

Danach erscheint das Fluor als in seiner Bindungskraft durch Sb geschwächter Valenzträger. Daß nicht das Antimon der alleinige oder der hauptsächliche Träger der Valenz ist und daß diese nicht als ein Rest an dem mit Fluor gesättigten Molekül zurückgeblieben ist, geht aus der Stärke der Valenz hervor und aus der Tatsache, daß $SbCl_3$ Brom nicht addiert. Erst die völlige Fluorierung macht Valenzbeträge frei, die von der Lehre von der geteilten Valenz teils am Antimon, teils hauptsächlich am Fluor (kollektiv) lokalisiert werden (vgl. den Artikel „Valenzletre"):



die Halogene zeigen die Abstufung

Chlor	Brom	Jod
keine Verbindung	$SbF_5 . Br$ schwache Wärmetönung	$SbF_5 . J$ $(SbF_5)_2J$ stärkere Wärmetönung

$SbCl_5$ verbindet sich nur noch mit Jod, wie ja auch Chlor sich nicht mit Brom verbindet. Aehnliche Verhältnisse liegen bei den Verbindungen vor, die SbF_5 und $SbCl_5$ untereinander bilden.

5c) Molekulare Komplexe und allotrope Modifikationen: Wie beim P und As läßt der geringe Unterschied in der Zahl der beiden Valenzarten komplexe Elementarmolekeln und allotrope Modifikationen erwarten; da die Komplexität hauptsächlich auf der negativen Valenz beruht, die beim Antimon abgeschwächt ist, so ist hier ein geringerer Grad zu erwarten.

Bestätigung: Die Dichte des Antimondampfes entspricht bei 1572° Molekeln von nur 3 Atomen, bei 2070° ist völliger Zerfall eingetreten. — Antimon bildet 3 bis 4 allotrope Modifikationen.

5d) Elektroaffinität; komplexe Ionen: Nach seiner Stellung im System und seiner Lage auf der Atomvolumkurve (kleines Atomvolum, kleine Elektroaffinität) wird das Antimon nur geringe Affinität zur positiven und negativen Elektrizität besitzen, die binären Verbindungen werden sehr zersetzlich sein und es wird eine große Neigung bestehen durch Komplexbildung die Elektroaffinität der Anionen und Kationen zu erhöhen; die 5-wertige Stufe wird sehr instabil sein.

Bestätigung: Antimonide und Antimonsalze sind fast vollständig hydrolysiert, doch wird bei der Elektrolyse elementares Antimon gefällt und auch die Eigenleitfähigkeit des $SbCl_3$ zeigt die Fähigkeit zur Bildung von $Sb^{\cdot\cdot\cdot}$-Ionen; $Sb^{\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot}$-Ionen sind praktisch kaum mehr vorhanden. — Die Neigung zur Komplexbildung, zur Vergrößerung des Volums, zur Verminderung der Ladung zeigt sich in der Bildung des „Antimonyls", in den basischen Salzen: SbOCl, $(SbO)_2SO_4$; sehr zahlreich sind die Anionenkomplexe mit Sauerstoff und Schwefel: Antimonition, Thioantimonition, Antimonation, Thioantimonation, dann die Ionen $[SbCl_6]''$ u. a.

6. Eigenschaften des Elements. Formarten und allotrope Modifikationen. Wie P und As existiert auch Sb in mehreren Modifikationen: als gelbes, als schwarzes, als graues metallisches Antimon; dazu kommt noch eine dem Sb eigentümliche Erscheinungsform, das explosive Antimon. Die metallische Modifikation ist schon seit dem Mittelalter bekannt, die anderen wurden erst in allerneuester Zeit aufgefunden.

6a) Gelbes Antimon. Das gelbe Antimon entspricht dem gelben Arsen und dem weißen Phosphor, ist also wohl wie diese regulär (Eutropie; Linck). Es entsteht nicht wie das gelbe Arsen durch rasches Abkühlen der Dämpfe, selbst bei Kühlung mit flüssiger Luft bildet sich nur schwarzes Antimon; Stock, der Entdecker dieser Modifikation, erhielt sie durch Einleiten von Sauerstoff in flüssigen SbH_3 bei —90°; die Temperatur darf nicht höher sein, da dann Schwärzung eintritt, nicht viel niedriger, da dann die Reaktionsgeschwindigkeit zu gering ist. Auch bei der Umsetzung $SbH_3 + 3Cl = Sb + 3HCl$ bildet, sich gelbes Sb; die Reaktion ist noch bei der Temperatur der flüssigen Luft so heftig, daß sich das Sb dunkel färbt; dagegen gibt die Einwirkung von Chlor auf eine Lösung von SbH_3 in flüssigem Aethan bei —109° und rotem Licht rein gelbes Antimon. Die Löslichkeit von gelbem Antimon in CS_2 ist in sehr enge Grenzen eingeschlossen: bei —90° ist sie noch verschwindend gering, bei Steigerung der Temperatur bildet sich eine gelbe kolloidale Lösung (sie geht farblos durchs Filter), die bald schwarze Flocken ausscheidet; bei —50° ist die Schwärzung in wenigen Sekunden beendigt; Belichtung wandelt noch bei den tiefsten Temperaturen um; das gelbe Sb ist viel labiler als das gelbe As.

6b) Schwarzes Antimon. Das schwarze Antimon, das nach den schon erwähnten Methoden entsteht — aus gelbem durch Belichtung oder Temperatursteigerung über —90° und natürlich auch bei der Oxydation von SbH_3 bei höheren Temperaturen, sowie bei der raschen Abkühlung von Sb-Dämpfen — ist von dem gewöhnlichen Antimon im Aussehen ganz verschieden, es scheint amorph zu sein, es hat eine geringere Dichte (5,3 gegen 6,1578), es ist leichter flüchtig, leichter oxydierbar (bis zur Selbstentzündung); bei 400° wandelt es sich momentan in graues metallisches um, aber auch schon beim Kochen mit Wasser langsam; es ist wohl auch bei gewöhnlicher Temperatur labil.

6c) Graues metallisches Antimon. Das graue Antimon, in das alle anderen Modifikationen beim Erhitzen übergehen und das gediegen in der Natur vorkommt, ist ein silberweißes Metall von starkem Glanz; es ist so spröde, daß es sich pulvern läßt; die Kristalle sind hexagonal. Spez. Gewicht = 6,5178; spezifische Wärme von —186° bis —79° = 0,0462, von —20° bis 0° = 0,0486, von 0° bis 100° = 0,0495, bei 300° = 0,05366; elektrische Leitfähigkeit bei 0° = $2,71 \times 10^4$, beim Fp. (fest) = $0,62 \times 10^4$; das absolute Wärmeleitvermögen beträgt von 0° bis 30° 0,042, bei 0° 0,0442, bei 100° 0,0396. Der Potentialsprung Sb/n-$SbCl_3$-lösung beträgt —0,376 Volt, doch ist dieser Wert wegen der Hydrolyse des Chlorürs nicht definiert, die Konzentration der Sb-Ionen wird sehr klein sein. Sicher ist, daß Sb edler als

Wasserstoff ist, da es diesen aus verdünnten Säuren nicht freimacht. In der thermoelektrischen Spannungsreihe nimmt Antimon eine extreme Stellung ein (vgl. den Artikel „Thermoelektrizität").

In seiner Legierungsfähigkeit erscheint das Sb ganz als Metall; von den Legierungen sind besonders die mit Blei (Hartblei, Letternmetall), mit Zinn (Britanniametall), mit Zinn, Blei, Kupfer (Weißgußmetall, Lagermetall) von technischer Bedeutung, von wissenschaftlicher Bedeutung sind die magnetischen Legierungen mit Mangan; mit Arsen bilden sich Mischkristalle, die sich wie Antimon-Zinn-Legierungen verhalten (die Verbindung SbAs kommt als Mineral vor — Allemontit); mit Phosphor entsteht die metallglänzende Verbindung SbP; Schwefelantimon hat metallischen Charakter und läßt sich mit Metall und anderen Sulfiden weitgehend legieren.

Bei 630,6° schmilzt das Antimon; die Schmelze besitzt Lösungsvermögen für Metalle und Sulfide und verhält sich wie ein anderes Lösungsmittel; die Zusätze drücken den Erstarrungspunkt in gesetzmäßiger Weise herunter und es läßt sich eine kryoskopische Konstante mit dem Wert 1240 ermitteln.

Der Schmelzpunkt liegt unter Atmosphärendruck bei 1360°, im Vakuum des Kathodenlichts schon bei 290°; der grüne Dampf besitzt bei 1572° das Molekulargewicht 310 = $Sb_{2,96}$, bei 1640° das Molekulargewicht 282 = $Sb_{2,68}$, bei 2070° fand von Wartenberg atomare Molekeln; — in metallischen Lösungen ergeben sich die Molekulargrößen Sb_2 (in Blei) und Sb(in Cadmium).

6d) Explosives Antimon. Aus Antimonchlorür-und-bromür-(nicht aus-fluorür-) Lösungen scheidet sich bei der Elektrolyse unter gewissen Bedingungen eine eigentümliche Form des Antimons, die explosive, ab:

aus 10 % $SbCl_3$-Lösung:	bei 16°	glänzendes explosives Sb;	bei 23°	gewöhnliches Sb
„ 15,6 % „ „	„ 0°	„ „	„ 30°	„ „
„ 20,2 % „ „	„ 10°	„ „	„ 50°	„ „

Je höher die Konzentration, desto höher die Temperatur, bei der Bildung von gewöhnlichem Antimon eintritt.

Das explosive Sb hat eine viel geringere Dichte als das gewöhnliche (5,78 gegen 6,5178); es explodiert, wenn man es ritzt, unter Wärmeentwickelung und Ausstoßung eines weißen Rauches und wandelt sich in gewöhnliches Sb um; die Umwandlung tritt auch beim Erwärmen auf 200° ein; der Rauch besteht aus $SbCl_3$, das mitgerissen wurde.

Der Gehalt an Halogenid ist nicht charakteristisch für das explosive Sb, auch das gewöhnliche Sb reißt bei der Elektrolyse Chlorür und Bromür mit und wenn man die Umwandlung des explosiven Sb in das gewöhnliche unter Aether vor sich gehen läßt, so wird an diesen nichts abgegeben, ebenso kann das Halogenid dem Metall durch Auskochen mit Lösungsmitteln nicht merklich entzogen werden. Das Halogenid ist in dem Metall in fester Lösung enthalten; der Gehalt ist um so größer, je größer die Konzentration in der Lösung ist, und beträgt im Maximum beim Chlorür 10,5 Proz., beim Bromür 14, beim Jodür 19.

Die Lösungswärme des explodierten (α-)Antimons in Brom-CS_2-Lösung ist identisch mit der des gewöhnlichen Antimons, die des explosiven (β-)Antimons aber ist um 20 bis 21 Cal. größer (Umwandlungswärme).

Hoher Gehalt an Halogenid und tiefe Temperatur vermindern die Explosivität; bei —80° kann gepulvert werden, ohne daß Explosion eintritt.

Der Unterschied der beiden Modifikationen wurde durch Cohen, dem man die eingehendsten Untersuchungen über das explosive Sb verdankt, auch elektrometrisch nachgewiesen. Er stellte die Kette

Sb gewöhnlich	$SbCl_3$-Lösung	Sb explosiv

zusammen und maß eine Potentialdifferenz von 18 Millivolt, wobei das explosive Antimon (als metastabile Modifikation) negativ war.

6e) Gegenseitige Beziehungen der Antimonmodifikationen. Das gelbe, das schwarze und das β-Antimon scheinen bei allen Temperaturen labil zu sein; β-Antimon ist vielleicht identisch mit dem schwarzen Antimon; die Umwandlung durch Licht deutet darauf hin, daß zwischen gelbem und schwarzem Sb Polymerie besteht.

6f) Beziehungen zu den Nachbarelementen. Man vergleiche die Tabelle S. 582.

6g) Chemisches Verhalten. Mit Wasserstoff verbindet sich Antimon nicht direkt (SbH_3 ist ja eine endotherme Verbindung). Gegen Sauerstoff ist es bei gewöhnlicher Temperatur beständig, beim Erhitzen verbrennt es zu Trioxyd. Mit den Halogenen findet heftige Vereinigung statt, gepulvertes Sb entzündet sich in Chlorgas. Mit Metallen bilden sich beim Zusammenschmelzen Antimonide. In HCl ist es unlöslich, Salpetersäure oxydiert zu antimoniger oder Antimonsäure.

6h) Physiologisches Verhalten. Antimon bildet mit As und P eine Gruppe von Giften, deren Wirkung im letzten Grunde auf einer tiefgreifenden Veränderung des Protoplasmas beruht. Bei Injektion wirkt Antimon ungefähr wie Arsen, im Magen veranlaßt es eine stärkere Lokalreizung (Aetzung) und löst den für die Antimonpräparate charakteristischen Brechreiz aus (Brechweinstein). — SbH_3 wirkt wie AsH_3: kleinere Mengen verursachen Kopfschmerzen, Schwindel, Uebelkeit; größere Atmungsverlangsamung, Erniedrigung der Körpertemperatur; Mäuse sind in 1% Gas nach wenigen Sekunden tot. Im übrigen bewirken die Sb-Verbindungen dieselben Symptome wie die Arsenverbindungen: Erweiterung der Blutgefäße, Herabsetzung des Blutdrucks usw.

7. Analytisches. Wie Antimon im Gang der qualitativen Analyse aufgefunden und getrennt wird, ist im Artikel „Chemische Analyse" angegeben. Charakteristisch für Sb ist die Entwicklung von SbH_3 durch naszierenden Wasserstoff aus antimonhaltigen Lösungen und dessen Zersetzung durch Erhitzen; auch beim raschen Abkühlen der SbH_3-Flamme (durch eine mit Wasser gefüllte Porzellanschale) wird elementares Antimon erhalten. In beiden Reaktionen zeigt Sb große Uebereinstimmung mit As; Unterschiede liegen darin, daß der Sb-Spiegel viel schwerer flüchtig ist als der As-Spiegel, und daß der Arsenspiegel nicht durch Hypochloritlösung oxydiert wird. — Vor dem Lötrohr auf Kohle werden die mit Soda und etwas Cyankalium gemengten Antimonverbindungen zu einem spröden Metallkorn reduziert, das in der oxydierenden Flamme zu As_2O_3 verbrennt. — Zink fällt metallisches Sb; nimmt man die Abscheidung in einem Platingefäß vor, so entsteht an der Berührungsstelle von Zn und Pt ein am Platin festhaftender schwarzer Niederschlag.

Quantitativ wird das Sb als Sulfür oder als Metall elektrolytisch bestimmt (siehe den Artikel „Chemische Analyse"); die letzte Methode kommt für die Trennung vom Zinn, die im Gang der Analyse auszuführen ist, allein in Betracht; als Elektrolyte werden die Alkalisalze der sulfantimonigen Säure verwendet, die aber kein Polysulfid enthalten dürfen.

8. Spezielle Chemie. 8a) Verbindungen des Antimons. Allgemeines. Die Valenzverhältnisse des Antimons sind im Abschnitt 5b) behandelt; in seinem Verhalten, in seinen Verbindungsformen schließt es sich im allgemeinen den Elementen seiner Gruppe, besonders dem Arsen an, in einigen Beziehungen aber steht es den Metallen der Zinngruppe, vor allem dem Germanium und dem Zinn nahe; die Aehnlichkeit mit Germanium veranlaßte den Entdecker dieses Elements, Cl. Winkler, es zunächst für das „Ekaantimon" Mendelejeffs zu halten; die Aehnlichkeit mit dem Zinn tritt besonders in dem Verhalten der Schwefelverbindungen gegen Schwefelalkalien hervor (Analyse). — Das Atomvolum beträgt ca. 33 (Kopp findet aus dem $SbCl_3$ 32,3, aus dem $SbBr_3$ 33,4; Thorpe gibt 28,6 an). Die Atomrefraktion (aus $SbCl_5$ berechnet) ist 25,66 (n-Formel).

8b) Verbindungen des dreiwertigen Antimons. — *α*) Antimonwasserstoff SbH_3. Es ist nur die Verbindung SbH_3 bekannt; fester Antimonwasserstoff konnte nach der oben (S. 584) beschriebenen Methode nicht festgestellt werden. — Der SbH_3 wurde 1837 von Thompson entdeckt. Er entsteht durch Einwirkung von naszierendem Wasserstoff auf Antimonverbindungen, doch bildet sich hierbei nur ein sehr antimonarmes Gasgemisch; zur Darstellung wird deshalb die Zersetzung von Antimoniden durch Säure verwendet: man nimmt Zink- oder besser Magnesiumantimonid (Sb: Mg = 1:2) und trägt dieses feingepulvert in gekühlte verdünnte Salzsäure ein; die Isolierung des SbH_3 wird erreicht, indem man das Gemisch von H_2 und SbH_3 durch ein mit flüssiger Luft gekühltes Rohr leitet, wobei das SbH_3 in fester Form zurückbleibt. — SbH_3 ist ein farbloses Gas von unangenehmem schwach an H_2S erinnerndem Geruch; die Dichte 4,360 (auf Luft bezogen) ist etwas größer als die theoretische; bei —18° verdichtet sich das Gas zu einer Flüssigkeit von der Dichte 2,26 bei —25°, 2,34 bei —50°, und von großem Lichtbrechungsvermögen, das dem des CS_2 mindestens gleichkommt; bei —91,5° wird der SbH_3 fest. — Die Löslichkeit in Wasser ist gering (1 Volum löst 1/5 Volum SbH_3), die Lösung ist, wenn das Wasser luftfrei war, ziemlich beständig; bessere Lösungsmittel sind Alkohol (1 Volum löst 15 Volumina SbH_3) und CS_2 (1 Volum löst bei 0° 250 Volumina SbH_3); auch Aether, Petroläther und Benzol lösen beträchtliche Mengen. Der SbH_3 ist eine endothermische Verbindung, bei seiner Zersetzung werden 34,27 Cal. pro Mol. frei (Stock aus der Explosionswärme; der Wert von Berthelot ist falsch). SbH_3 ist daher labil, er zersetzt sich langsam von selbst und oft tritt ohne ersichtlichen Anlaß ein explosionsartiger Zerfall ein; dieser erfolgt auch bei Steigerung der Temperatur über 200° und durch den elektrischen Funken (selbst bei einer Verdünnung mit 40% H_2).

Die Zersetzung des SbH_3 in Wasserstoff und elementares Sb war der Gegenstand vieler Untersuchungen; zunächst verfolgte man dabei den praktisch-analytischen Zweck, Unterschiede in dem Verhalten des SbH_3 zu dem analogen des AsH_3 aufzufinden, um bei der gerichtlich wichtigen Arsenprobe von Marsh die beiden Elemente auseinander halten zu können; später in der Zeit der reaktionskinetischen Unter

suchungen, wandte sich das Interesse dem Zersetzungsvorgang selbst zu: er erwies sich als ein Musterbeispiel einer katalytischen heterogenen Reaktion (Stock und Bodenstein).

In einem trockenen, sorgfältig gereinigten Gefäß mit vollständig glatten Wänden zersetzt sich SbH_3 bei gewöhnlicher Temperatur überaus langsam, nach 24 Stunden ist erst der Bruchteil eines Prozents zerfallen; im weiteren Verlauf findet aber eine andauernde Steigerung der Geschwindigkeit statt, die also mit der Menge des ausgeschiedenen Antimons zunimmt (Autokatalyse). Ein ganz anderes Bild ergibt sich, wenn man die Zersetzung in einem Gefäß vor sich gehen läßt, das vorher mit einer Sb-Schicht[1]) überzogen wurde: hier ist die Geschwindigkeit von Anfang an beträchtlich, in 24 Stunden sind 90% des SbH_3 zersetzt.

Die Katalysierung des SbH_3-Zerfalls ist keine spezifische Eigenschaft des Antimons, ebenso wirkt eine Arsen- oder Silberschicht oder Quecksilber, ja auch in Gefäßen mit mattgeätzten Wänden findet ein rascher Zerfall statt und wenn man die Zersetzung in gewöhnlichen Gefäßen genau beobachtet, so findet man, daß sie an irgendeiner rauhen Stelle beginnt, etwa da, wo der letzte Tropfen Wasser, von der Reinigung her, verdunstete. Es handelt sich demnach wohl vorwiegend, wenn nicht ausschließlich, um rein physikalische Katalyse. Stark beschleunigend wirkt auch Wasserdampf (das feuchte Gas ist in 24 Stunden nahezu völlig zerfallen) und Salzsäure (Reinigung des aus saurer Lösung entwickelten SbH_3!). Die Wirksamkeit der Sb-Schichten ist außerordentlich verschieden je nach der Herstellungsart; sie ist nicht nur von der Größe, sondern auch von der Beschaffenheit der Oberfläche abhängig; von einer gewissen Schichtdicke ab wird die Wirksamkeit bei allen gleich und bleibt bei weiterer Sb-Abscheidung konstant.

Van't Hoff glaubte zuerst derartige Gasreaktionen bei monomolekularem Verlauf nach dem Schema der Rohrzuckerinversion behandeln zu können: $dx/dt = k(a-x)$; Messungen am AsH_3 und PH_3 schienen die Theorie zu bestätigen.

Später erkannte man die Bedeutung der Gefäßwände und ausgeschiedener fester Stoffe für den Verlauf von Gasreaktionen, den Einfluß der Diffusion und Absorption, und durch die Untersuchungen von Stock und Bodenstein wurden die Verhältnisse beim SbH_3 völlig geklärt.

Daß die experimentellen Befunde beim AsH_3 und PH_3 einer monomolekularen Reaktion im homogenen System zu entsprechen schienen, lag daran, daß die Versuche nicht lange genug ausgedehnt wurden — erst im späteren Verlauf der Zersetzung treten die Abweichungen stärker hervor — und daran, daß die Formel nicht geeignet ist, Aenderungen im Verlauf der Reaktion hervortreten zu lassen. Diese werden deutlich, wenn man die relativen Geschwindigkeiten bestimmt und diese Geschwindigkeiten auf die Geschwindigkeit bei der Konzentration 1 bezieht $\left(\lambda = \frac{V_c}{V_1}\right)$. Es wurde gefunden:

Konzentration	λ
0,408	1,56
0,279	1,79
0,182	2,32

Hieraus geht hervor, daß von einer monomolekularen Reaktion im homogenen System keine Rede sein kann, da bei einer solchen ja die λ-Werte konstant sein müßten. Man erhält vielmehr annähernd die Beziehung:

$$\lambda = \frac{1}{C^{1/2}} = \frac{1}{\sqrt{C}}$$

d. h. die Reaktionsgeschwindigkeit ist nahezu der Wurzel aus der SbH_3-Konzentration umgekehrt proportional. — Die mittleren Temperaturkoeffizienten betragen:

für das Intervall	0°—10°	2,05
„ „ „	30°—40°	1,80
„ „ „	60°—70°	1,66

Der Reaktionsverlauf wird erklärt durch folgende Annahmen: 1. Der Zerfall des SbH_3 erfolgt ausschließlich in der am Antimon adsorbierten Gashaut; die Geschwindigkeit dieser Reaktion ist proportional der absorbierten Menge und bestimmt die Geschwindigkeit der Gesamtreaktion; 2. die Diffusion des SbH_3 in die Gashaut, die Einstellung des Gleichgewichts mit dem Gasraum, erfolgt mit ungleich größerer Geschwindigkeit und ist ohne Einfluß auf die Geschwindigkeit der Gesamtreaktion.

Diese Annahmen werden dadurch gestützt, daß der Temperaturkoeffizient der Gesamtreaktion der einer chemischen Reaktion ist, nach seinem absoluten Wert und nach der Abnahme mit steigender Temperatur. Die genaue Formulierung ergibt folgendes:

Die adsorbierte Menge ist nach dem für gelöste Stoffe und für Gase geltenden Adsorptionsgesetz $M = \alpha C^p$, wo α und p zwei von der Art der Stoffe und der Temperatur abhängige Konstante sind; p ist kleiner als 1 und nähert sich diesem mit steigender Temperatur. Hieraus ergibt sich für die Geschwindigkeit:

$$V = k'.\frac{\alpha C^p}{C} = \frac{k}{C^{1-p}}$$

für das Verhältnis zweier Geschwindigkeiten bei verschiedenen Konzentrationen (bei derselben Reaktion zu verschiedenen Zeiten):

$$A = \frac{V_{t_1}}{V_{t_2}} = \frac{k}{C_{t_2}^{1-p}} \cdot \frac{C_{t_1}^{1-p}}{k} = \left(\frac{C_{t_1}}{C_{t_2}}\right)^{1-p}$$

und bei Beziehung auf die Konzentration 1 ($C_{t_1} = 1$):

$$A = \frac{1}{C^{1-p}}$$

Diese Form des Reaktionsverlaufs wurde aber experimentell gefunden (siehe oben); p ist ungefähr = 0,5, besser = 0,6.

[1]) Es ist nicht angebracht, von einem Sb-Spiegel zu reden; die analytische Chemie, die von außen betrachtet, bezeichnet die Antimonabscheidung mit Recht so, hier aber kommt die rauhe Innenfläche in Betracht.

Für die umgesetzten Mengen ergibt sich $-dC/dt = k \cdot C^p$; mit $p = 0{,}6$ erhält man:

Konzentration	k
1,000	0,062
0,940	
0,144	0,069
0,123	

Beigemischter Wasserstoff, also auch der bei der Reaktion entstehende ist ohne Einfluß auf den Zerfall des SbH_3; durch Sauerstoff dagegen wird der Katalysator „vergiftet“, doch erholt er sich in Berührung mit SbH_3 rasch wieder.

Zu derselben Klasse von katalysierten Reaktionen wie der Zerfall des SbH_3 (Unabhängigkeit von der Diffusion) gehört wohl auch die Katalyse des Knallgases am Porzellan und der Zerfall des AsH_3 und PH_3; die Geschwindigkeit bei diesen letzten Reaktionen ist zwar, besonders im Anfang, proportional der Gaskonzentration, doch erklärt sich dies einfach dadurch, daß die Temperatur des Zerfalls in diesen Fällen um mehrere hundert Grad höher über der Siedetemperatur liegt als beim SbH_3 und daß bei höherer Temperatur der Exponent p sich dem Wert 1 nähert. Diesen Reaktionen steht eine andere Gruppe gegenüber bei denen die Diffusion bestimmend ist (Knallgaskatalyse am Platin, SO_3 nach dem Kontaktverfahren).

Chemisches Verhalten. Mit Sauerstoff oder Luft erfolgt Umsetzung zu elementarem Antimon und Wasser; die Zersetzung ist bei gewöhnlicher Temperatur nach 24 Stunden ziemlich vollständig und findet noch bei —90°, dem Schmelzpunkt des SbH_3, statt, wobei sich das Sb in der gelben Modifikation abscheidet; in flüssiger Luft dagegen sinkt der SbH_3 als weiße Masse zu Boden, es findet keine Umsetzung mehr statt. — Stickoxyd und Stickoxydul werden reduziert; es entsteht Stickstoff und in geringen Mengen Ammoniak. — Ammoniak katalysiert den Zerfall, Kohlensäure oxydiert bei höherer Temperatur. — Chlorgas reagiert sehr heftig, mit Knall und Feuererscheinung, Brom und Jod wirken schwächer; es bildet sich $SbCl_3$ und HCl usw.

Auch Lösungen von Oxydationsmitteln reagieren, Chlorwasser und starke Salpetersäure unter Explosion und Feuererscheinung; alkalische Lösungen katalysieren.

Von festen Körpern wirkt Schwefel ein unter Bildung von H_2S und Sb_2S_3; die Antimonhalogenide bilden Sb und Halogenwasserstoff; Alkalien (Natronkalk) katalysieren; man trocknet mit $CaCl_2$ und P_2O_5.

Flüssiger SbH_3 zersetzt sich rasch; nach 24 Stunden ist die Flüssigkeit verschwunden.

Alkylverbindungen des SbH_3. Vom SbH_3 leiten sich wie vom PH_3 und AsH_3 Alkylverbindungen ab, die Stibine; man kennt nur die tertiären Derivate. Darstellungsweisen und Eigenschaften s. im Artikel „Organische Verbindungen der Metalle“.

Die tertiären Stibine sind selbstentzündliche, in Wasser unlösliche Verbindungen, in denen das Antimon (analog wie Phosphor und Arsen) große Neigung zeigt in den 5-wertigen Zustand überzugehen: Sauerstoff, Schwefel, Chlor werden addiert zu den Verbindungen $SbR_3(O)(S)(Cl_2)$ die auch als Oxyd, Sulfid, Chlorid des 2-wertigen Radikals $[SbR_3]$ aufgefaßt werden können (vgl. S. 595).

Mit Jodalkyl entstehen die Stiboniumsalze und aus diesen mit feuchtem Silberoxyd die Stiboniumhydroxyde; es sind starke Salze und Basen. Die molekulare Leitfähigkeit bei 25° beträgt:

	16	64	256	1024
$Sb(CH_3)_4Cl$	—	98,2	103,8	106,9
$Sb(CH_3)_4OH$	178	181,0	183,0	

Die Leitfähigkeit der Stiboniumverbindungen ist etwas geringer als die der Arsonium- und Phosphoniumverbindungen.

β) Verbindungen des Sb^{III} mit den Halogenen. Für die Sb-halogenide ist charakteristisch ihre leichte Hydrolysierbarkeit und die Bildung von Komplexen. Durch die Hydrolyse entstehen Niederschläge von schwerlöslichen Oxyhalogeniden (SbOCl, Algarotpulver); setzt man aber Alkalihalogenide zu, so unterbleibt die Ausscheidung, indem sich Salze der komplexen Säuren vom Typus $MSbHal_4$ bilden.

Antimontrifluorid SbF_3. — SbF_3 entsteht durch Verbrennen von metallischem Antimon in Fluorgas oder durch Destillation von Sb-Pulver mit HgF_2, oder aus einer Lösung von Sb_2O_3 in HFl (metallisches Antimon löst sich nicht in Flußsäure).

SbF_3 scheint dimorph zu sein (außer Oktaedern auch Prismen oder Schüppchen); $d_{20} = 4{,}379$, Molekularvolum = 40,3. In feuchter Luft zerfließt SbF_3, raucht aber nicht, wie die anderen Sb-Halogenide, und scheidet auch in wässeriger Lösung kein Oxyfluorid ab (Neigung des Fluors zur Komplexbildung); Hydrolyse ist aber vorhanden: die Lösung reagiert sauer und beim Eindampfen geht HF weg, während ein Oxyfluorid zurückbleibt.

Beim Auflösen von Gemischen von Sb_2O_3 und Alkalikarbonat in Flußsäure entstehen komplexe Alkali-Antimonfluoride, deren wässerige Lösungen sauer reagieren, also teilweise in Alkalifluorid und Antimonfluorid gespalten sind ($LiSbF_4 \cdot LiF$; $4CsSbF_4 \cdot 3SbF_3$).

Antimonchlorid $SbCl_3$. $SbCl_3$ ist eine der am längsten bekannten Antimonverbindungen. Schon Basilius Valentinus stellte es durch Destillation von Sb_2S_3 und $HgCl_2$ dar und gab ihm den Namen Butyrum antimonii (Antimonbutter). Glauber stellte es aus Trisulfid, NaCl und H_2SO_4, oder aus

Trioxyd und HCl dar. Weiter entsteht es beim Verbrennen von Sb im Chlorstrom (zusammen mit $SbCl_5$), oder besser durch Einwirkung von Chlor auf Sb_2S_3, wobei ein leicht trennbares Gemisch von Chlorschwefel und $SbCl_3$ entsteht. Am besten erhält man es durch Kochen von Antimonium crudum (rohes Sb_2S_3) mit Salzsäure. Man konzentriert und destilliert dann, wobei die Chloride der fremden Metalle mit Ausnahme des Eisenchlorids zurückbleiben; von diesem trennt man das Antimonchlorid, indem man es zunächst als Oxychlorid durch Wasserzusatz ausfällt und dann in HCl löst.

Das destillierte reine $SbCl_3$ erstarrt zu einer weichen kristallinischen Masse (zuweilen erhält man rhombische Kristalle); $d_{26} = 3{,}064$. $SbCl_3$ schmilzt bei $93{,}2^0$ zu einer farblosen Flüssigkeit von der Dichte 2,676 und dem Molekularvolum 100,7 und siedet unter Atmosphärendruck bei 223^0, unter einem Druck von 14 mm bei 103^0. Die Dampfdichte ist 7,96 statt 7,85.

In CS_2 und Aether löst sich $SbCl_3$ und scheidet sich unverändert wieder aus. Andererseits ist es selbst ein Lösungsmittel für viele Stoffe und wird für kryoskopische Bestimmungen verwendet; die Depressionskonstante beträgt 184. Salze sind in $SbCl_3$ gut dissoziiert; Bromkalium hat bei 80^0 und den Verdünnungen 100 und 200 die Aequivalentleitfähigkeiten 80,7 und 99,0. Die spezifische Eigenleitfähigkeit des reinen $SbCl_3$ beträgt bei 80^0 $109{,}0 \times 10^{-6}$.

Antimontrichlorid zeigt eine Reihe von Additionsreaktionen: $SbCl_3.NH_3$, $SbCl_3.3C_6H_5NH_2$, $SbCl_3.C_9H_7N$ (Chinolin).

Mit Alkali- und Erdalkalichloriden, sowie mit Salzsäure werden komplexe Verbindungen gebildet: in einer Lösung von $SbCl_3$ in Kochsalzlösung entsteht bei der Verdünnung kein Niederschlag; die Lösung reagiert neutral, Hydrolyse ist nicht nachzuweisen. (K_3SbCl_6; $SbCl_3.2KCl$; $2SbCl_3.3CsCl$; $2SbCl_3.HCl.2H_2O$.)

Mit $SbBr_3$ und mit SbJ_3 bildet $SbCl_3$ eine lückenlose Reihe von Mischkristallen.

Von den Umsetzungen des $SbCl_3$ ist besonders wichtig die mit Wasser (Hydrolyse), wobei sich Oxychloride abscheiden; in wenig Wasser löst sich $SbCl_3$ klar:

Temperatur	0^0	15^0	20^0	25^0	30^0	35^0	40^0	50^0	60^0	70^0
Gelöste Mole $SbCl_3$ in 100 Mol Wasser	47,9	64,9	73,0	78,6	84,9	91,6	108,8	152,5	300,4	∞

Aehnlich wie die wässerige Lösung verhält sich eine Lösung in Formamid; mit steigender Verdünnung werden immer mehr Cl-Atome gegen die Gruppe NH.COH ausgetauscht: $Sb(NH.COH)_3$ — „Amidolyse".

Mit konzentrierter H_2SO_4 wird Antimonsulfat gebildet, mit Sb_2S_3 entsteht Sulfochlorid.

Antimontribromid $SbBr_3$. — $SbBr_3$ entsteht beim Eintragen von gepulvertem Sb in flüssiges Brom unter Feuererscheinung und großer Wärmeentwickelung; man verdünnt deshalb besser mit CS_2. — Das reine $SbBr_3$ ist eine farblose kristalline Masse; durch Sublimation und bei der Ausscheidung aus CS_2-Lösung werden zuweilen rhombische Kristalle erhalten; $d_{32} = 4{,}148$.

$SbBr_3$ schmilzt bei 90 bis 94^0 zu einer Flüssigkeit vom spezifischen Gewicht 3,641 und von dem Molekularvolum 116,8, und siedet bei $275{,}4^0$; die Dampfdichte ist 12,57 statt 12,48. — $SbCl_3$ ist in seinem Verhalten, besonders in der Hydrolyse und Komplexbildung ein völliges Analogon des $SbCl_3$.

Antimontrijodid SbJ_3. — SbJ_3 entsteht aus Jod und gepulvertem Antimon; die Reaktion ist sehr heftig, weshalb man das Jod besser in CS_2-Lösung anwendet; man reinigt durch Sublimation. — $SbCl_3$ kristallisiert in 3 verschiedenen Formen, deren Beziehungen noch nicht ganz klar gestellt sind. Die stabile Form, rubinrote hexagonale Kristalle von der Dichte 4,848 bei 26^0, entsteht, wenn bei der Sublimation die Temperatur über 114^0 steigt, und aus Lösungen beim Verdunsten; läßt man die CS_2-Lösung im Sonnenlicht verdunsten, so entsteht zuweilen eine zweite, metastabile Form, rote monokline Kristalle von der Dichte 4,768 bei 22^0; durch Sublimation bei tieferen Temperaturen erhält man eine dritte, wohl die am wenigsten stabile Form, grüngelbe rhombische Kristalle. Bei höheren Temperaturen gehen die monokline und die rhombische Modifikation in die hexagonale über. Das Schmelzdiagramm ergibt nur eine (wenig dissoziierte) Verbindung SbJ_3 (Fp. $170{,}8^0$), die mit Sb wenig mischbar ist, mit Jod ein Eutektikum bei 80^0 mit 88,2 Atomprozent Jod bildet.

Die stabile Modifikation schmilzt bei 167^0 zu einer granatroten Flüssigkeit, die bei 401^0 siedet; die Dichte des Dampfes beträgt 17,59 anstatt 17,33; schon beim Schmelzpunkt ist SbJ_3 sehr flüchtig.

SbJ_3 löst sich in CS_2 und Alkohol; in Benzol ist es unlöslich.

In seinem Verhalten (Hydrolyse, Komplexbildung) gleicht das SbJ_3 dem $SbBr_3$ und $SbCl_3$. Die Hydrolyse ist weniger stark; die Komplexsalze mit Alkalijodiden leiten

sich meist von der Säure $H(SbJ_4)$ ab; zum Teil sind diese Salze in Alkalijodid und SbJ_3 zerfallen, da man mit CS_2 der Lösung SbJ_3 entziehen kann und ein großer Ueberschuß von Wasser Oxyjodid fällt (HCl, Weinsäure, Essigsäure erschweren die Abscheidung).

γ) Verbindungen des Sb^{III} mit Sauerstoff. — Antimontrioxyd Sb_4O_6. Das Antimontrioxyd kommt in der Natur als rhombisches Weißspießglanzerz und als regulärer Senarmontit (Oktaeder) vor. Man erhält es durch Verbrennen von Antimon an der Luft (mit etwas Sb_2O_4) oder durch Glühen in Wasserdampf oder durch Oxydation mit Bleioxyd. Bequemer erhält man es auf nassem Wege durch Kochen von $SbCl_3$, Algarotpulver u. a. Verbindungen mit Alkalilaugen oder Karbonatlösungen.

Die Beziehung zwischen den beiden Modifikationen (Monotropie oder Enantiotropie) ist noch nicht sichergestellt; die Dichte der rhombischen Form ist 5,6, die der regulär-oktaedrischen 5,22 bis 5,33. Beim raschen Erhitzen geht die reguläre Modifikation in die rhombische über, es steht aber nicht fest, ob diese bei allen Temperaturen die stabilere ist.

Sb_4O_6 besitzt zwischen 18° und 100° eine spezifische Wärme von 0,0927; es schmilzt bei dunkler Rotglut und verdampft bei noch höherer Temperatur; die Dichte des Dampfes bei 1560° beträgt 19,60 anstatt 19,19 für Sb_4O_6.

Sb_4O_6 ist in Wasser unlöslich, ebenso in verdünnter H_2SO_4 und HNO_3; mit Salzsäure bildet sich das Chlorid, mit Weinsäure entstehen komplexe Antimonyltartrate, mit Alkalien Antimonite; diese Verbindungen sind alle wasserlöslich.

Wasserstoff, Kohlenoxyd, Kohle, Cyankalium reduzieren zu Metall; die Reaktion mit Wasserstoff ist umkehrbar, im geschlossenen Raum stellt sich ein Gleichgewicht ein.

Beim Glühen an der Luft entsteht Sb_2O_4; vgl. S. 606.

Antimonhydroxyd. Es sind nur die beiden Hydrate $Sb(OH)_3$ und $Sb_2H_4O_5$ bekannt; das erste entsteht durch Zersetzung von Antimonylweinsäure oder von Brechweinstein mit H_2SO_4; das zweite soll entstehen, wenn man eine alkalische Lösung von Sb_2S_3 mit $CuSO_4$ entschwefelt und dann ansäuert. Die Hydrate gehen allmählich von selbst, rascher beim Erwärmen — auch unter Wasser (wie das $Cu[OH]_2$) — in das Anhydrid über (große Dissoziationsspannung).

$Sb(OH)_3$ ist nur in amorphem Zustand bekannt. Es hat amphoteren Charakter: es löst sich in Alkalien zu Antimoniten, und andererseits als Base in Säuren.

Antimonite $MSbO_2$. Die durch Lösen von $Sb(OH)_3$ in Alkalien erhaltenen Salze leiten sich von der metaantimonigen Säure $HSbO_2$ ab; nur die Natriumsalze sind kristallisiert zu erhalten ($NaSbO_2 . 3H_2O$); mit Schwermetallsalzen entstehen Niederschläge, z. B. ein hellgrünes Cupriantimonit (aus alkalischer Brechweinsteinlösung mit $CuSO_4$).

Die Alkaliantimonite sind stark hydrolysiert (alkalische Reaktion); sie reduzieren ammoniakalische Silbernitratlösung zu metallischem Silber, Chromate zu Chromiten usw. Alle Stibiosalzlösungen oxydieren sich leicht an der Luft.

Löslichkeit der Antimonsalze. Mit Säuren bildet das Sb_2O_3 Salze, die ebenfalls stark hydrolysiert sind; dies ist der Grund dafür, daß sich in der Löslichkeit des Trioxyds in Säuren eine deutliche Abhängigkeit von der Säurekonzentration und der Stärke der Säure zeigt. Es ist aber zu beachten, daß die Abhängigkeit von der Säurekonzentration nur so lange besteht, als nur ein Bodenkörper (Sb_2O_3) vorhanden ist; sobald ein zweiter Bodenkörper (Oxysalz) auftritt, ist nach der Phasenregel der Zustand der Lösung bei einer bestimmten Temperatur nur von der Art der Säure abhängig und im übrigen genau festgelegt (Quadrupelpunkt). Im allgemeinen ist die Löslichkeit um so größer, je stärker die Säure ist; und ebenso, je größer die Komplexität der basischen Salze, je geringer also ihre Tendenz ist, $Sb^{\cdots}$-Ionen abzuspalten.

Säure	K	Konzentration der Säure	% Sb_2O_3 in Lösung
Ameisensäure	0,0214	4,3 -n	0,01
		26,5 -n	0,23
Essigsäure	0,0018	16,59-n	0,14
		17,20-n	0,42
Propionsäure	0,00134	12,81-n	0,11
Mono-Chloressigsäure	0,155	7,4 -n	0,15
Di-Chloressigsäure	5,14	5,4 -n	0,23
Tri-Chloressigsäure	121	2,41-n	0,15 (!)
Malonsäure	0,158	0,5 -n	0,018
		5,0 -n	0,053
Bernsteinsäure	0,00165	0,5 -n	0,002
Maleinsäure	1,17	2,5 -n	0,32

(!) basisches Salz im Bodenkörper.

Antimonoxyhaloide. Am längsten bekannt und am besten untersucht von den basischen Salzen des Antimons sind die Oxyhaloide, die bei der Hydrolyse der Sb-halogenide entstehen. Es stellen sich von der Temperatur und der Säurekonzentration abhängige Gleichgewichte ein; durch wiederholte Erneuerung des Wassers kann alles Halogen aus dem Niederschlag entfernt werden.

Antimonylfluorid $Sb_4F_6O_3$. Entsteht beim Abdampfen einer Lösung von SbF_3 oder beim Pressen von feuchtem SbF_3.

Antimonylchloride. Schon Paracelsus (1493 bis 1541), Glauber und Basilius Valentinus beschreiben die Produkte, die bei der Einwirkung von Wasser auf $SbCl_3$ entstehen; sie bezeichneten das weiße Pulver als „Mercurius vitae", später erhielt dieses, nach dem Arzt Algarotus, der es als Heilmittel einführte, den Namen Algarotpulver.

Die Hydrolyse des $SbCl_3$ wurde von Sabanejew aufgeklärt; er zeigte, daß zunächst SbOCl entsteht, das weiterhin in $Sb_4O_5Cl_2$ übergeht; durch van Bemmelen wurde noch ein 3. Oxychlorid aufgefunden, dem wohl die Formel $Sb_3O_2Cl_5$ zukommt.

SbOCl: entsteht beim Erhitzen von $SbCl_3$ mit der äquimolekularen Menge Alkohol im geschlossenen Rohr bei 160°; das Kristallsystem steht nicht fest (rhomboedrisch oder monoklin); die Bildungswärme aus den Elementen beträgt 89,8 Cal; die Substanz löst sich in CS_2, Benzol, Chloroform, nicht in Wasser, Alkohol, Aether; beim Erhitzen geht SbOCl in $SbCl_3$ und $Sb_4O_5Cl_2$ über.

$Sb_4O_5Cl_2$: entsteht beim Erhitzen von $SbCl_3$ mit Alkohol im Verhältnis 1:3 auf 150°; Kristallsystem monoklin; löslich in Salzsäure und Weinsäure, unlöslich in Alkohol. Diese Verbindung ist der Hauptbestandteil des Algarotpulvers, das bei der Hydrolyse von $SbCl_3$ entsteht (der amorphe Niederschlag wird allmählich, schneller beim Erwärmen, kristallin). Bei hohen Temperaturen zerfällt die Verbindung in Oxyd und Chlorid.

$Sb_3O_2Cl_5$: entsteht aus sehr konzentrierten Lösungen von $SbCl_3$ in Wasser (1 Mol $SbCl_3$ auf weniger als 2½ Mol Wasser bei 10°); die Substanz kristallisiert in Säulen; Wasser zersetzt unter Bildung von SbOCl.

Die Existenzbedingungen im System $SbCl_3$—HCl—H_2O oder Sb_2O_3—HCl—H_2O (unabhängige Bestandteile) sind von Le Chatelier und von van Bemmelen untersucht worden: als Bodenkörper wurden gefunden $SbCl_3$, $Sb_3O_2Cl_5$, SbOCl, $Sb_4O_5Cl_2$, Sb_2O_3; zwei Bodenkörper ergeben nach der Phasenregel einen Quadrupelpunkt, es wurden zwei bestimmt (bei 20°):

Bodenkörper	MolHCl auf 100 Mol Wasser	Mol$SbCl_3$ auf 100 Mol Wasser
$SbCl_3 . Sb_3O_2Cl_5$	3,6	68,3
$Sb_3O_2Cl_5 . SbOCl$	9	25

Die Quadrupelpunkte werden durch Tripelkurven verbunden.

Antimonylbromid $Sb_4Br_2Cl_5$. Entsteht durch Einwirkung von Wasser auf $SbBr_3$, gleicht in allen Beziehungen den entsprechenden Chlorverbindungen.

Antimonyljodid SbJ_4O_5. Entsteht durch Hydrolyse des SbJ_3 oder durch Einwirkung von alkalischer Jodlösung auf eine weinsaure Lösung von Brechweinstein. Zerfällt beim Erhitzen in Sb_2O_3 und SbJ_3.

δ) Verbindungen des Sb^{III} mit Schwefel. — Antimontrisulfid Sb_2S_3. Das wichtigste Antimonerz, der Spießglanz oder Antimonit ist Sb_2S_3. Durch Aussaigern von der Gangart getrennt, stellt er das „Antimonium crudum" des Handels dar; dieses enthält noch viele Verunreinigungen, Sulfide des Pb, Cu, As, Fe; reines Sb_2S_3 erhält man durch Zusammenschmelzen von Antimon und Schwefel unter einer Kochsalzdecke, es bildet eine kristalline grauschwarze Masse; dasselbe Produkt erhält man, wenn man gefälltes Sb_2S_3 unter Luftabschluß schmilzt. Die thermische Analyse des Systems Sb-S ergibt nur eine Verbindung, eben Sb_2S_3, und zwei Eutektika.

Außer in der kristallisierten Form kennt man Sb_2S_3 auch im amorphen Zustand; je nach der Darstellung sind Farbe und Eigenschaften verschieden. Eine dunkelviolette Form erhält man, wenn man geschmolzenes Sulfid in kaltes Wasser eingießt; durch Fällung von Antimonsalzlösungen mit H_2S entstehen orangerot gefärbte Niederschläge (über die kolloidalen Sulfidlösungen vgl. Abschnitt 11).

Die Umwandlung der amorphen Modifikation in die kristalline erfolgt beim Erhitzen der trockenen Substanz oder beim Kochen der Niederschläge mit der Lösung.

Die spezifische Wärme des Sb_2S_3 beträgt zwischen 20 und 500° 0,0816, in der Nähe von 500° 0,220, oberhalb des Fp. 0,263. Der Schmelzpunkt liegt bei ca. 550°; die Schmelzwärme wurde kalorimetrisch zu 17,5 Cal bestimmt, aus kryoskopischen Bestimmungen ergeben sich 16,7 Cal. Sowohl der natürliche wie der künstlich hergestellte Antimonit zeigen große Lichtempfindlichkeit der elektrischen Leitfähigkeit, die Empfindlichkeit wird durch Verunreinigungen und Abweichungen im Schwefelgehalt stark vermindert (Aufstellung eines Sb-S-Diagramms); setzt man die Dunkelleitfähigkeit = 100, so beträgt das Maximum im Licht 500.

Antimontrisulfid bildet mit metallischem Antimon und mit anderen Metallsulfiden Systeme, die sich genau wie Legierungen verhalten (Pélabon): z. B. zeigt das Diagramm Sb_2S_3—Ag_2S zwei Maxima, die den Verbindungen $Sb_2S_3 . Ag_2S$ und $Sb_2S_3 . 3 AgS$ entsprechen, und 3 Eutektika, welche alle drei ungefähr bei 440° liegen. — Die Schmelzen verhalten sich wie gewöhnliche Lösungen, so daß kryoskopische Bestimmungen ausgeführt werden können (kryoskopische Konstante = 790); für das elementare Antimon ergab sich eine Molekulargröße von 113 d. h. Antimon ist in Form von Atomen (120) gelöst. Die Mischbarkeit von Sb und Sb_2S_3 ist beschränkt, es tritt Schichtenbildung ein; die Löslichkeit

von Sb in Sb_2S_3 steigt von 11,28% Metall bei 539° auf 21,1% bei 118°.

Chemisches Verhalten. Sb_2S_3 wird bei Temperaturen über 360° durch H_2 umkehrbar zu Metall reduziert: $Sb_2S_3 + 3H_2 \rightleftarrows Sb_2 + 3H_2S$. Wenn Metall und Sulfür als Phasen vorhanden sind, stellt sich ein vom Druck unabhängiges Verhältnis von H_2 zu H_2S heraus (vgl. S. 583); mit der Temperatur ist das Verhältnis veränderlich und verschiebt sich mit steigender Temperatur zugunsten des (endothermen) H_2S:

Temperatur	440°	510°	555°	610°	625°
% H_2S	43,22	48,6	51,8	56,01	56,92

CO reduziert nur unvollkommen; Kohle liefert Metall und CS_2; Cyankalium führt das Sulfür nur zum Teil in Metall über, ein anderer Teil bildet Kaliumthioantimonit, KCN geht in KCNS über. Ebenfalls schwefelentziehend wirken die Metalle Na, K, Cu, Fe, Sn; doch bildet hierbei das freigewordene Sb mit dem Ueberschuß des Metalls Antimonid. — Fein gepulvertes Sulfür oxydiert sich an der Luft zu Sb_2O_3, während beim Glühen Sb_2O_4 und SO_2 gebildet wird. Chlor gibt $SbCl_3$ und Schwefelchlorür. Verdünnte Säuren sind ohne Wirkung, konzentrierte HCl zerlegt in der Wärme in Chlorür und H_2S.

Alkalien und Schwefelalkalien lösen leicht (Ammoniak nur wenig); die Lösungen enthalten Antimonite und Thioantimonite und scheiden beim Ansäuern Sb_2S_3 ab. Thioantimonite entstehen auch beim Zusammenschmelzen von Sb_2S_3 mit Schwefelmetallen. Die Reaktion spielt eine große Rolle in der Metallurgie des Antimons und es ist anzunehmen, daß auch viele natürliche Thioantimonite auf diese Weise entstanden sind.

Eine gesättigte wässerige Lösung von Sb_2S_3 hat eine elektrische (spezifische) Leitfähigkeit von $8{,}006 \times 10^{-6}$; hieraus ergibt sich eine Löslichkeit von $5{,}2 \times 10^{-6}$ Mol/Liter (Weigel).

Thioantimonige Säure H_3SbS_3. Die freie thioantimonige Säure ist nicht bekannt, sie zerfällt sofort nach der Entstehung in Sb_2S_3 und H_2S. Die Erklärung ist darin zu sehen, daß das komplexe Anion in geringem Maße S''-Ionen abspaltet, die sich mit H·-Ionen zu H_2S vereinigen. Demgemäß sind die Komplexionen bei saurer Reaktion unbeständig, während neutrale oder alkalische Reaktion dem Zerfall entgegenwirkt.

Die Alkalisalze bilden sich aus Sb_2S_3 und Alkalisulfid- oder Alkalihydroxydlösungen. Auch auf trockenem Wege entstehen sie, beim Zusammenschmelzen von Sb_2S_3 mit Schwefelmetallen oder Sulfaten unter Zusatz von Kohle; die Mineralien Pyrargyrit (Ag_3SbS_3) und Miargyrit ($AgSbS_2$) sind auf diese Weise künstlich dargestellt worden (aus AgCl und Sb_2S_3).

Aus den wässerigen Lösungen der Alkalisalze fallen mit Metallsalzlösungen dunkle Niederschläge von Thioantimoniten, aus konzentrierten Lösungen entstehen Doppelsalze.

Die Löslichkeit des Sulfürs in Alkalien scheint mit der OH'-Ionenkonzentration zuzunehmen. So erklärt sich die Abscheidung von Kermes (s. u.) beim Erkalten einer heiß gesättigten Lösung von Sb_2S_3 in Soda (Rückgang der Hydrolyse); Kaliumhydroxydlösungen zeigen die Erscheinung nicht, da die OH'-Ionenkonzentration sich hier nur wenig mit der Temperatur ändert; wird aber durch Bikarbonat die Dissoziation zurückgedrängt, so findet auch hier die Abscheidung eines kermesähnlichen Niederschlags statt.

Man kennt 4 Reihen von Thioantimoniten: Abkömmlinge der Säuren H_3SbS_3 (ortho), $H_4Sb_2S_5$ (pyro), $HSbS_2$ (meta) und $H_2Sb_4S_7$; bei den Alkalisalzen scheint sich ein Gleichgewichtszustand zwischen Alkalisulfid und den verschiedenen Thioantimoniten auszubilden. Die Lösungen der Alkalisalze absorbieren Sauerstoff, es bildet sich Antimonit, Antimoniat, Sulfantimoniat. Kochen mit Schwefel führt in Salze der Thioantimonsäure über.

Antimonoxysulfide (Gemische von Sulfid und Oxyd). Antimonblende oder Rotspießglanzerz (rote, monokline Kristalle von der Dichte 4,6) ist Sb_2S_2O. Ein Produkt von derselben Zusammensetzung erhält man, wenn man Wasserdampf in der Glühhitze über das Sulfür leitet, doch hat man wohl darin ein Gemisch von Sulfid und Oxyd zu sehen, ebenso wie in den zahlreichen S- und O-haltigen Präparaten, die früher in der Pharmazie eine große Rolle gespielt haben oder als Malerfarben Verwendung finden: Kermes, Antimonzinnober, Antimonrubin, Spießglanzsafran usw. Man erhält diese Präparate auf nassem und trockenem Wege: Antimonzinnober (Malerfarbe) entsteht beim Erwärmen einer Lösung von $SbCl_3$ mit Natriumthiosulfat, die Zusammensetzung wechselt; Kermes (früher als Brechmittel verwendet) wird u. a. gewonnen, indem man Sb_2S_3 mit Soda kocht, aus der Lösung fällt beim Erkalten Kermes als rotbraunes Pulver aus; Antimonsafran oder Crocus antimonii bildet sich, wenn man Sb_2S_3 mit wenig Kalilauge behandelt (das Sb_2S_3 geht zunächst in ein Gemenge von Antimonit und Thioantimonit über, die sich ungleich in Kalilauge lösen, die Thioverbindung ist viel löslicher); setzt man zu der Lösung in Kalilauge Bikarbonat, so fällt ein kermesähnlicher Niederschlag.

Auf trockenem Wege erhält man Gemische von Sb_2O_3 und Sb_2S_3, wenn man Sb_2S_3

unterhalb des Schmelzpunktes abröstet und dann mit Sulfür zusammenschmilzt: man gewinnt so ein gelb- bis dunkelrotes Glas — Antimonglas, vitrum antimonii (ähnlich Antimonrubin).

Sulfoxyantimonite wurden noch nicht erhalten. — Sb_3S_3O wird durch Wasserstoff zu Metall reduziert, heiße Salzsäure zersetzt unter Bildung von H_2S.

Antimonhalogensulfide. Beim Auflösen von Sb_2S_3 in $SbCl_3$ entsteht ohne Zweifel Sulfochlorür, doch konnte dieses noch nicht isoliert werden; die Masse zersetzt sich beim Erhitzen in Chlorür und Sulfür, das zurückbleibt. — Dagegen konnte das Sulfojodür SbSJ rein dargestellt werden; man erhält es aus Jod und Trisulfid oder beim Zusammenschmelzen von Sb_2S_3 und SbJ_3; der Ueberschuß des SbJ_3 wird mit verdünnter HCl entfernt; das SbSJ bildet dunkelrotbraune metallglänzende Kristalle (konzentrierte Säuren zerlegten beim Kochen).

Antimontriselenid Sb_2Se_3. — Sb_2Se_3 entsteht durch Zusammenschmelzen der Elemente oder durch Fällung mit H_2Se aus Brechweinsteinlösung (schwarzes Pulver, das bei 145° sintert). Das Selenid schmilzt bei 605°; es ist wie das Sulfür mit Antimonmetall beschränkt mischbar; im Schmelzdiagramm Sb-Se liegt ein Maximum bei Sb_2S_3. — Bei der Reduktion bilden sich wie beim Sulfür Gleichgewichtszustände; an der Luft verbrennt Sb_2Se_3 zu Sb_2O_3 und SeO_2; es löst sich in Alkaliseleniden zu Selenantimoniten auf.

Antimontellurid Sb_2Te_3. — Sb_2Te_3 entsteht beim Zusammenschmelzen der Elemente; es schmilzt bei 595°; mit Antimonmetall ist es unbeschränkt mischbar (im Gegensatz zum Sb_2S_3 und Sb_2Se_3; im Schmelzdiagramm entspricht Sb_2Te_3 ein Maximum.

Antimonphosphid SbP. Aus Antimon und Phosphor (oder phosphoriger Säure und Kohle) entsteht beim Schmelzen weißes sprödes metallglänzendes Antimonphosphid; bei Einwirkung von Phosphor auf $SbBr_3$ in CS_2-Lösung bildet sich ein rotes amorphes in Aether und CS_2 unlösliches Produkt.

Antimonarsenid. Das Mineral Allemontit ist Antimonarsenid von der Formel SbAs. — Antimon und Arsen bilden Legierungen, die im Maximum 35 Proz. Arsen enthalten (Mischkristalle); die Zusammensetzung Sb_3As tritt in dem Diagramm nicht hervor.

ε) Salze des Sb^{III} mit Sauerstoffsäuren. Antimonsulfat $Sb_2(SO_4)_3$. — Entsteht beim Auflösen des Metalls oder Oxyds in konzentrierter H_2SO_4. Lange seidenglänzende Nadeln, d = 2,6246, sehr hygroskopisch; mit Wasser bildet sich das Hydrat $Sb_2(SO_4)_3.2,5H_2O$, welches durch mehr Wasser hydrolysiert wird; beim Erhitzen wird SO_3 abgespalten, es bleibt Sb_2O_3 und Sb_2O_4 zurück. — Basische Salze entstehen durch Hydrolyse der Neutralsalze, z. B. $(SbO)_2SO_4$. — Außerdem vermag Antimon in das Sulfatanion einzutreten in der komplexen Säure $H[Sb(SO_4)_2]$; Salze dieser Säure entstehen beim Auflösen von Alkalisulfat und Antimonoxyd in konzentrierter H_2SO_4; die komplexen Salze sind viel beständiger als das Sulfat.

Antimonnitrat $Sb(NO_3)_3$. — $Sb(NO_3)_3$ entsteht beim Auflösen von Sb_2O_3 in kalter rauchender Salpetersäure; kleine perlglänzende Kristalle; beim Erhitzen bildet sich Pentoxyd und Tetroxyd, mit Wasser Trioxyd.

Antimonacetat $Sb(C_2H_3O_2)_3$ — $Sb(C_2H_3O_2)_3$ entsteht beim Erhitzen von 1 Mol Sb_2O_3 mit 5 Mol Essigsäureanhydrid am Rückflußkühler; es ist leicht löslich in Essigsäureanhydrid und Eisessig, etwas in Benzol und CS_2; das Salz ist äußerst hygroskopisch, es zersetzt sich in feuchter Luft.

ζ) Komplexsalze des Sb^{III} mit organischen Säuren. Antimon besitzt große Neigung zur Komplexbildung, vor allem kommen hier die hydroxylhaltigen organischen Verbindungen (Oxysäuren) in Betracht.

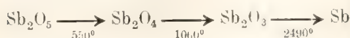
Am längsten bekannt ist der Brechweinstein ($2C_4H_4O_6.SbOK.3H_2O$), welcher beim Kochen von saurem Kaliumtartrat mit Sb_2O_3 sich bildet; ähnliche Verbindungen bilden Milch- und Glycolsäure. Alle diese Salze sind im Vergleich zu den gewöhnlichen Antimonsalzen wenig hydrolytisch gespalten; die Sb-Ionenkonzentration ist sehr gering, doch kann immerhin durch H_2S Sulfür ausgefällt werden. — Zahlreiche Komplexsalze bildet die Oxalsäure.

8c) Verbindungen des vierwertigen Antimons. Vom 4-wertigen Antimon sind nur wenige Verbindungen bekannt: das Tetroxyd (Sb_2O_4), ein Hydrat desselben ($H_2Sb_2O_5$) und eine Reihe komplexer Halogensalze von der Zusammensetzung M_2SbX_6, Analoga der Platin- und Zinn-Komplexsalze; die freien Tetrahalogenverbindungen sind jedenfalls in Lösung vorhanden, konnten aber nicht isoliert werden; die Existenz eines Tetrasulfids Sb_2S_4 ist noch nicht sichergestellt.

α) Antimontetroxyd Sb_2O_4. Die Mineralien Antimonocker, Cervantit, Stiblith bestehen im wesentlichen aus wasserhaltigem Tetroxyd; andere lassen sich als Abkömmlinge des Tetroxyds auffassen (Hypoantimonate), z. B. Romeïn $CaSb_2O_5$. — Tetroxyd entsteht beim Erhitzen von Antimonmetall, Trioxyd, Sulfür (Spießglanz) an der Luft, beim Glühen von Nitrat, sowie bei höheren

Temperaturen (über 300°) aus Sb_2O_5 durch Sauerstoffabgabe (s. u.).

Sb_2O_4 ist ein weißes Pulver, d = 6,69; es läßt sich nicht schmelzen und nicht sublimieren; in Wasser ist es fast unlöslich, rötet aber feuchtes Lackmuspapier; gegen Säuren ist es sehr beständig, konzentrierte HCl löst teilweise auf. — Kohle, Cyankalium, sowie die Alkalimetalle reduzieren zu elementarem Antimon (Antimonid); Erhitzen mit Antimon oder mit Sulfür führt zu Trioxyd. Dieses entsteht auch beim Erhitzen auf höhere Temperatur durch Sauerstoffabgabe. Die Tensionen der Sb-Oxyde wurden von Biltz festgestellt; Atmosphärendruck wird bei folgenden Temperaturen erreicht:



$$Sb_2O_5 \xrightarrow[550^0]{} Sb_2O_4 \xrightarrow[1060^0]{} Sb_2O_3 \xrightarrow[2490^0]{} Sb$$

Das Tetroxyd verhält sich wie ein Gemisch von Tri- und Pentoxyd.

Hydrate des Tetroxyds. Hypoantimonate. Beim Zusammenschmelzen des Sb_2O_4 mit Alkalien und Alkalikarbonaten entstehen Verbindungen von der Form $Me_2Sb_2O_5$, die Hypoantimonate (s. o.). Als Ausgangsmaterial für die Hypoantimonate dient das Kaliumsalz $K_2Sb_2O_5$, das man durch Schmelzen von Tetroxyd mit KOH erhält; es ist in kaltem Wasser schwer-, in heißem leichtlöslich, durch wenig HCl wird das Salz $K_2Sb_4O_9$ ausgefällt; die Lösung verhält sich wie ein Gemisch von Antimonit und Antimonat.

β) Antimonchlorwasserstoffsaure Salze. Beim Versetzen einer salzsauren Lösung von $SbCl_3$ mit einer äquivalenten Menge von $SbCl_5$ entsteht eine dunkelbraune Färbung, die wohl auf die Bildung von $SbCl_4$ zurückzuführen ist. Die Intensität der Färbung steigt mit der Temperatur und der Konzentration der Säure; man hat das Gleichgewicht:



$$SbCl_3 + SbCl_5 \rightleftharpoons 2SbCl_4;$$

die Bildung von $SbCl_4$ verläuft unter Wärmeabsorption.

Durch Zusatz von Alkalichlorid werden aus dieser Lösung in einigen Fällen dunkelviolette oktaedrische Kristalle der komplexen Salze abgeschieden; am leichtesten erhält man das Cäsium- und das Rubidiumsalz: Cs_2SbCl_4 und Rb_2SbCl_4. — Die entsprechenden Salze des Kaliums und Ammoniums können wegen ihrer Löslichkeit auf diese Weise nicht gewonnen werden; man hat aber isomorphe Mischungen derselben mit K_2PtCl_6 und $(NH_4)_2PtCl_6$, sowie mit K_2SnCl_6 und $(NH_4)SnCl_6$ erhalten (4-Wertigkeit des Antimons). — Weitere Doppelverbindungen sind $Rb_2SbCl_6.2Rb_3SbCl_6$ u. a. (3- und 4-wertiges Sb). Rb_2SbBr_6 entsteht, wenn man RbBr zu einer mit viel Brom versetzten Lösung von $SbBr_3$ in konzentrierter HBr hinzufügt; dunkelviolette, sechsseitige Täfelchen.

8d) Verbindungen des 5-wertigen Antimons. *α*) Verbindungen mit den Halogenen. — Antimonpentafluorid SbF_5. Antimonpentafluorid entsteht, wenn man Sb_2O_5 in Flußsäure löst und eindampft; es hinterbleibt eine amorphe Masse, die aber Wasser konstitutionell gebunden enthält. Reines SbF_5 gewinnt man aus $SbCl_5$ und wasserfreiem HF nach der Gleichung: $SbCl_5 + 5HF = SbF_5 + 5HCl$; man kocht 3 Tage lang bei 25—30° am Rückflußkühler und destilliert dann. — SbF_5 ist eine farblose dicke, ölige Flüssigkeit, die bei niederen Temperaturen erstarrt und bei 150° siedet; $d_{22,7} = 2{,}993$. An feuchter Luft bildet sich das Hydrat $SbF_5.2H_2O$; Wasser löst klar; mit NH_3 entsteht die hygroskopische Verbindung $(SbF_5)_2(NH_3)_3$, die in Wasser mit saurer Reaktion ziemlich unzersetzt löslich ist. Die wässerige Lösung kann nur wenige Antimonionen enthalten, da H_2S nur ganz langsam einwirkt; auch die Umsetzung mit Alkalien und Alkalikarbonaten zu Antimonaten und die Abscheidung von freiem Jod aus Jodiden erfolgt sehr langsam. Das komplexe Ion ist offenbar viel beständiger als das entsprechende der Chlorverbindung, wie meist bei Fluorverbindungen.

SbF_5 bildet interessante Additionsverbindungen: SbF_5Br und SbF_5J (Fp. 80°), $SbF_5.S$ (Fp. 230°); die Verbindungen spalten sich leicht bei der Destillation oder durch Wasser; in neuerer Zeit wurde noch die Verbindung $SbF_5.NOF$ entdeckt, die ebenfalls durch Wasser unter Bildung von Stickoxyden zersetzt wird, aber ohne Zersetzung geschmolzen und destilliert werden kann (unterhalb Rotglut!). Diese Verbindungen sind wichtig für die Valenzlehre (vgl. S. 595).

Metafluorantimonsäure $HSbF_6$. Mit Alkalifluoriden bildet SbF_5 analog dem Trifluorid beständige komplexe Salze, die sich von der Metafluorantimonsäure ableiten: $K(SbF_6)$, $K(SbF_6).KF.2H_2O$ u. a. — Mit SbF_3 bilden sich unter Wärmeentwickelung zwei Verbindungen: $SbF_5.2SbF_3$ und $SbF_5.5SbF_3$; die Kp. liegen bei 390° und 384°; der Dampf der Verbindung $SbF_5.2SbF_3$ ist bei 444° in seine Komponenten gespalten.

Antimonpentachlorid $SbCl_5$. Feingepulvertes Antimon verbrennt in einer Chloratmosphäre zu $SbCl_5$; die Verbindung wurde 1815 von Rose entdeckt; die Darstellung geschieht durch Einleiten von Chlor in $SbCl_3$. — $SbCl_5$ ist eine meist

gelblich gefärbte Flüssigkeit, die unangenehm riecht und an feuchter Luft raucht; $d_{20} = 2,346$; die Molekularrefraktion für die rote H-Linie α ist 74,61 (n-Formel). Bei tiefen Temperaturen scheiden sich nadelförmige Kristalle aus, die bei —6° schmelzen; der Siedepunkt liegt bei 140°, (Zersetzung in $SbCl_3$ und Chlor); bei vermindertem Druck kann ohne Zersetzung destilliert werden, unter einem Druck von 22 mm bei 179°, unter einem Druck von 14 mm bei 68°. Das flüssige $SbCl_5$ leitet im Gegensatz zu $SbCl_3$ den elektrischen Strom nicht und vermag auch gelöste Salze nicht zu dissoziieren; dagegen zerfällt es selbst in Ionen, wenn es in SO_2 oder $SbCl_3$ gelöst wird. Die Dielektrizitätskonstante bei 21,5° beträgt 3,78.

Chemisches Verhalten. $SbCl_5$ wird in der organischen Chemie als Chlorierungsmittel verwendet; H_2S bildet Sulfochlorid $SbSCl_3$.

Additionsverbindungen. $SbCl_5$ vereinigt sich mit einer großen Anzahl von anorganischen und organischen Verbindungen zu Molekularverbindungen. Zunächst mit einer Reihe von Metalloidchloriden: $SbCl_5.SCl_4$, $SbCl_5.CNCl$, $SbCl_5.PCl_5$ u. a.; dann mit anderen anorganischen Neutralteilen: $SbCl_5.3HCN$, $SbCl_5.6NH_3$; dann mit organischen Verbindungen: $SbCl_5.(C_2H_5)_2O$, $SbCl_5.CH_3CHO$, $SbCl_5.CH_3COOH$ u. a. Interessant sind die Additionsverbindungen mit Säuren: Für die Anzahl von Molekülen $SbCl_5$, die gebunden werden, ist die Zahl der CO-Gruppen maßgebend (Acetessigester: $2SbCl_5.C_6H_{10}O_3$); aus den Additionsverbindungen der zweibasischen Säuren und Oxysäuren wird beim Erwärmen HCl abgespalten und es entstehen Verbindungen, in denen ein H-Atom durch $SbCl_4$ ersetzt ist: Beispiele sind die Abkömmlinge der Oxalsäure $(COOSbCl_4)_2$, der Phtalsäure $C_6H_4(COO.SbCl_4)_2$ u. a.

Metachlorantimonsäure $HSbCl_6$. Durch Anlagerung von Metallchloriden an $SbCl_5$ entstehen komplexe Salze, welche sich meist von der Metachlorantimonsäure, $HSbCl_6$ ableiten. Die Säure entsteht beim Einleiten von Chlor in eine stark salzsaure Lösung von $SbCl_3$. Beim Eindampfen scheiden sich hygroskopische grüngelbe Kristalle von der Zusammensetzung $HSbCl_6.4\frac{1}{2}H_2O$ ab. Gefrierpunktsbestimmungen ergeben elektrische Dissoziation ($H^{\cdot}$ und $SbCl_6'$); Chlorion ist nicht in nennenswertem Betrag vorhanden, da die Fällung von AgCl nur langsam vor sich geht. Beim Stehen scheidet sich Antimonsäure ab.

Die Metachlorantimoniate werden dargestellt, indem man das Metallchlorid in HCl gelöst zu $SbCl_5$ fügt und die Lösung mit Chlorgas sättigt; beim Stehen über konzentrierter H_2SO_4 scheiden sich grünlichgelbe hygroskopische Substanzen aus; in Lösung zerfallen sie in Antimonsäure und HCl.

Man kennt zwei Hydrate des $SbCl_5$: $SbCl_5.H_2O$ und $SbCl_5.4H_2O$; sie entstehen wenn man $SbCl_5$ mit wenig eiskaltem Wasser behandelt. Das Tetrahydrat addiert HCl und gibt die Verbindung $SbCl_5.5HCl.10H_2O$; mit mehr Wasser erfolgt Hydrolyse und es entsteht Antimonsäure.

Antimonpentabromid $SbBr_5$. Das Pentabromid konnte noch nicht isoliert werden, doch sind Analoga zu den Chlorantimoniaten bekannt. Sie entstehen, wenn man $SbBr_3$, in rauchender HBr gelöst, mit Metallbromiden, ebenfalls in bromwasserstoffsaurer Lösung, versetzt, Brom im Ueberschuß zugibt und über H_2SO_4 kristallisieren läßt. Die Säure selbst wird erhalten, wenn man Brom im Ueberschuß zu einer Lösung von $SbBr_3$ in HBr gibt, sie hat die Zusammensetzung $HSbBr_6.3H_2O$. — Die Säure und die Salze sind schwarz, in dünner Schicht dunkelrot; sie sind weniger beständig als die entsprechenden Chlorverbindungen, spalten leicht Brom ab und gehen in Salze des Tribromids über, durch Wasser werden sie hydrolysiert.

Antimonpentajodid. SbJ_5 existiert nicht, wie die thermische Analyse ergibt, es gibt aber ein Eutektikum von ähnlicher Zusammensetzung (80 Proz. Sb). Man erhitzt Sb mit Jod im zugeschmolzenen Rohr.

β) Verbindungen der Sb^V mit Sauerstoff. — Antimonpentoxyd Sb_2O_5. — Sb_2O_5 entsteht durch Oxydation von Antimon mit Salpetersäure oder HgO; oder durch Entwässerung der Antimonsäure bei Temperaturen unter 300°. — Sb_2O_5 ist ein gelbliches Pulver, das sich wie die niedrigen Oxyde beim Erhitzen dunkler färbt; spezifisches Gewicht = 5,6. Sb_2O_5 ist in Wasser unlöslich, doch wird blaues Lackmuspapier gerötet; es schmilzt nicht und ist nicht unzersetzt flüchtig, vielmehr geht es bei höheren Temperaturen in Sb_2O_4 über (vgl. S. 606).

Beim Glühen im Chlorstrom wird der Sauerstoff allmählich verdrängt, es bildet sich aber nicht Pentachlorid, sondern Trichlorid und Trioxyd; werden die Reaktionsprodukte nicht entfernt, so stellt sich wohl ein Gleichgewicht zwischen Trioxyd, Chlor, Sauerstoff und $SbCl_3$-Dampf ein. — Ebenso entsteht mit Schwefel Trioxyd und SO_2 und schließlich Sulfür. — Mit PCl_3 bildet sich bei 160° $SbCl_3$ und P_2O_5. — Kaliumhydrosulfid löst zu Kaliumsulfantimoniat, Kalilauge löst nur wenig.

Antimonpentoxyd ist ein Oxydationsmittel; die salzsaure Lösung macht aus Jodkalium Jod frei.

Antimonsäuren. Vom Sb_2O_5 leiten sich wie vom P_2O_5 3 Säuren ab: H_3SbO_4, $H_2Sb_2O_7$, $HSbO_3$ (Ortho-, Pyro-, Metasäure); von diesen Säuren sind viele Salze, Chloride usw. bekannt, dagegen keine Ester.

Orthoantimonsäure H_3SbO_4. Orthoantimonsäure entsteht durch Zerlegung des Kaliumantimoniats mit Salpetersäure, oder durch Hydrolyse des Pentachlorids, oder durch Oxydation des Trichlorids mit Salpetersäure (1,4). Die letzte Methode eignet sich am besten zur Darstellung: aus der roten Lösung fällt Wasser ein Hydrat $2H_3SbO_4 . 3H_2O$, das kurz nach der Fällung, wenn man die Säure sorgfältig auswäscht, in Wasser löslich ist, beim Stehen aber bald unlöslich wird; ebenso trübt sich die Lösung nach einiger Zeit von selbst und scheidet ein wasserärmeres Hydrat ($2H_3SbO_4 . H_2O$) aus, bei Säurezusatz tritt diese Ausscheidung sofort ein. Man hat es demnach mit einer kolloidalen Lösung zu tun: die Löslichkeit ist beträchtlich, 22 g Sb_2O_5 im Liter; nach einigen Stunden sind nur noch 3 g gelöst. — Beim Stehen über H_2SO_4 gehen alle Hydrate in H_3SbO_4 über.

Die Orthosäure ist ein weißes, in Wasser unlösliches Pulver, das aber Lackmus rötet. Wesentliche Unterschiede im Verhalten der drei Hydrate sind nicht vorhanden, sie lösen sich aber um so leichter in Halogenwasserstoffsäuren und Kalilauge auf, je wasserreicher das Hydrat ist (das Na-Salz ist schwerlöslich). — H_3SbO_4 ist wie Sb_2O_5 ein Oxydationsmittel.

Beim Erhitzen auf 200° geht die Orthosäure in Pyrosäure über und diese weiterhin in Metasäure. Die Metasäure erhält man auch durch Fällen einer Lösung von $KSbO_3$ mit Salpetersäure.

Antimoniate. Die antimonsauren Salze sind zum größten Teil Salze der Metasäure ($MSbO_3$). Das Kaliumsalz, das Ausgangsmaterial für alle anderen, entsteht durch Oxydation von Antimon oder Antimonoxyd mit Salpeter; nach dem Auskochen mit Wasser hinterbleibt ein weißes Pulver von der Zusammensetzung $KSbO_3$; allmählich löst sich dieses in heißem Wasser auf, die Lösung gibt mit Metallsalzen schwerlösliche Niederschläge; diese erhält man auch durch Umsetzung kolloidaler Antimonsäurelösung mit Metallacetaten.

Die Pyroantimoniate entsprechen zwei Formeln $M_4Sb_2O_7$ (?) und $M_2H_2Sb_2O_7$.

Eigentliche Orthoantimoniate scheinen nur vom Aluminium und vom Fe^{III} zu existieren.

Von den Pyroantimoniaten ist wichtig das saure Kaliumsalz, das durch Zusammenschmelzen von $KSbO_3$ mit KOH und Zersetzung des Produkts durch Wasser entsteht: Die Lösung ist ein Reagenz auf Natriumionen, die mit dem Anion $H_2Sb_2O_7$ einen schwer löslichen Niederschlag von $Na_2H_2Sb_2O_7 . 6H_2O$ bilden.

Antimonoxyhalogenide. Auch vom Sb^V leiten sich Oxyhalogenide ab, die man als Säurehalogenide auffassen kann.

Antimonyltrichlorid $SbOCl_3$. — Es entsteht, wenn man zu $SbCl_5$ die berechnete Menge Wasser tropfenweise zusetzt. — Gelbliche kristalline Masse, sehr hygroskopisch, zerfließt zu einer syrupartigen dicken Flüssigkeit, aus der über H_2SO_4 Nadeln sich ausscheiden. Außerdem sind bekannt: $SbOCl_3 . 2SbCl_5$ (Fp. 85°) und $SbOCl_3 . SbO_2Cl$.

Antimonylfluorid $SbOF_3$. Es ist ein Komplexsalz $SbOF_3 . NaF . Na_2O$ bekannt, welches beim Erwärmen von $NaSbF_6$ entsteht.

γ) Verbindungen des Sb^V mit Schwefel. — Antimonpentasulfid Sb_2S_5. — Sb_2S_5 fällt durch H_2S aus einer weinsauren Lösung von $SbCl_5$ oder aus einer Suspension von $HSbO_3$, am bequemsten erhält man es durch Zersetzung von Natriumthioantimonat, $NaSbS_4$ durch Schwefelsäure. — Sb_2S_5 ist eine dunkelorangerote, amorphe Substanz, die in indifferenten Lösungsmitteln, wie Wasser, Alkohol u. a. unlöslich ist, von Alkalien, Alkalikarbonaten, Alkalisulfhydraten und Ammoniak aber zu Salzen der Thioantimon- und Antimonsäure gelöst wird; in Ammonkarbonat ist es im Gegensatze zu Sb_2S_3 unlöslich. Beim Erhitzen auf 220°, ebenso beim Kochen mit Wasser, sowie durch Einwirkung von Sonnenlicht findet Spaltung in Trisulfid und Schwefel statt; bei 100 bis 110° soll es unzersetzt flüchtig sein.

Wie beim Arsen erhält man beim Fällen mit H_2S (und bei anderen Darstellungsmethoden) kein reines Sb_2S_5: CS_2 und Terpentinöl entziehen bei gewöhnlicher Temperatur der Substanz Schwefel. Wie beim As ist die Säurekonzentration von Einfluß: bei der Einwirkung von H_2S auf Antimonsäure erhält man das beste Resultat, wenn 12 % freie HCl vorhanden sind; der Niederschlag enthält dann 40 % Sb_2S_5. — Gegen Oxydations- und Reduktionsmittel verhält sich das Sb_2S_5 im wesentlichen wie das Sb_2S_3; Chlorwasserstoff führt in $SbCl_3$ über, es entwickelt sich H_2S und Schwefel fällt aus.

Thioantimonsäure. Die freie Säure ist ebensowenig wie die freie thioantimonige Säure bekannt; bei der geringsten $H^{\cdot}$-Ionenkonzentration zerfällt sie in Sb_2S_5 und H_2S. Dagegen existieren viele gut kristallisierende Salze, Thioantimonate, die, wie schon erwähnt, durch Lösung von Sb_2S_5 in Alkalien oder Schwefelalkalien entstehen, oder auch

durch Kochen von Sb_2S_3 mit Schwefel und Alkali, oder endlich durch Zusammenschmelzen von Sb_2S_3, Schwefel und Alkali; es ist nicht nötig, Schwefel zuzusetzen; die Tendenz zur Bildung des Pentasulfids ist so groß, daß es sich unter teilweiser Reduktion des Sb_2S_3 zu freiem Sb auch ohne Schwefel sich bildet. Die Thioantimonate leiten sich von der Orthosäure ab; die Alkalisalze und Erdalkalisalze sind mit gelber Farbe in Wasser löslich; mit Schwermetallsalzen entstehen meist dunkel gefärbte, amorphe schwerlösliche Niederschläge.

Die Alkalithioantimonate sind gegen Erhitzen auf hohe Temperatur unempfindlich, Schwermetallsalze spalten dabei Schwefel ab und gehen in Antimonit über. Säuren, selbst Kohlensäure, scheiden Sb_2S_5 ab; an der Luft findet Oxydation zu Thiosulfat statt. Kochende Alkalien lösen aus Schwermetallsalzen das Antimon heraus und lassen Schwefelmetall zurück.

Antimonsulfochlorid. Das Chlorid der Thioantimonsäure $SbSCl_3$ entsteht durch Umsetzung von $SbCl_5$ mit H_2S. Die Verbindung ist hygroskopisch und zerfällt mit Wasser in Schwefel und Algarotpulver; beim Erhitzen entsteht $SbCl_3$ und Schwefel.

Antimonpentaselenid Sb_2Se_5. Entsteht analog dem Sb_2S_5 aus Selenoantimonat und Salzsäure; im Schmelzdiagramm findet sich kein Pentaselenid angedeutet; beim Erhitzen bildet sich Triselenid und Selen.

Selenoantimonsäure. In Darstellung und Verhalten der Schwefelverbindung analog.

9. Thermochemie. Die Wärmetönungen beziehen sich auf die Bildung aus den Elementen:

Sb_2O_3	(fest)	163,0	Cal.
Sb_2O_4	(„)	209,8	„
Sb_2O_5	(„)	229,6	„
H_3SbO_3	(„)	83,7*	„
H_3SbO_4	(„)	114,4*	„
SbH_3	(gasförmig)	—33,96	„
SbF_3	(„)	141,0	„
$SbCl_3$	(fest)	91,39	„
$SbCl_5$	(flüssig)	104,87	„
$SbBr_3$	(fest)	61,4	„
SbJ_3	(„)	28,8	„
Sb_2S_3	(„)	32,6†	„

* aus Sb, O und H_2O.
† aus Sb und rhombischem Schwefel.

10. Photochemie. Starke Linien liegen im Funkenspektrum bei 6005, 4352, 4315, 3597, 3241, 3041; im Bogenspektrum bei 3268, 3233, 2878 A.-E.

11. Kolloidchemie. Vom elementaren Sb wurde durch elektrische Zerstäubung ein braunrotes, wenig haltbares Isobutylalkosol hergestellt, ebenso ist die Lösung des gelben Sb in CS_2 eine kolloidale (s. S. 596). Von den Verbindungen bildet das Hydrat der Antimonsäure ($2 H_3SbO_4 . 3 H_2O$) und besonders das Trisulfid kolloidale Lösungen. Aus Trioxydlösungen erhält man wegen der geringen Konzentration nur schwach gelb gefärbte Sole, aus ca. 0,5% Brechweinsteinlösungen aber tiefrote, im durchfallenden Licht klare, im auffallenden opalisierende Lösungen; höher konzentrierte Lösungen lassen infolge der Elektrolytwirkung gleich das Sulfidgel ausfallen. Das Hydrosol besitzt eine noch größere Färbekraft als das Arsensulfid, in einer Verdünnung von $1:10^6$ zeigt es noch deutliche Gelbfärbung. Das Hydrosol ist ziemlich beständig: es kann ohne Veränderung zum Sieden erhitzt werden. Bei längerem Stehen altern die Lösungen, d. h. es findet eine Vergröberung der Teilchen statt; zur Gelbildung sind höhere Elektrolytkonzentrationen nötig als beim Arsensulfid. Die Teilchen sind negativ geladen und wandern zur Anode.

Literatur. *Die Handbücher der anorganischen Chemie von* ***Abegg*** *und z. T. von* ***Gmelin-Kraut*** *sowie einige neuere Arbeiten.*

A. Stirm.

c) α) Wismut.

Bismuthum. Bi. Atomgewicht 208,0.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung. 5. Verwendung. 6. Charakteristik. 7. Eigenschaften des Metalles. 8. Analytisches Verhalten. 9. Legierungen. 10. Verbindungen, in denen das Wismut niedriger als dreiwertig erscheint. 11. Verbindungen, in denen das Wismut dreiwertig erscheint. 12. Verbindungen, in denen das Wismut höher wertig erscheint.

1. Atomgewicht. Die internationale Atomgewichtskommission gibt für 1912 das Atomgewicht des Wismuts zu 208,0 an. Die Unsicherheit dieser Zahl beträgt einige Einheiten in der ersten Dezimalen. Der Atomgewichtswert steht in Uebereinstimmung mit der Avogadroschen Regel (Dampfdichte des Wismutchlorids), der Regel von Dulong und Petit, der Lehre vom Isomorphismus (Isomorphie des Elementes und seiner Verbindungen mit Arsen und Antimon) und dem periodischen System der Elemente.

2. Vorkommen. Das Wismut gehört zu den selteneren Elementen und findet sich

meist gediegen, auf Gängen besonders in Gneis und als Begleiter von Kobalt- und Silbererzen, vor. Sein Hauptvorkommen in Deutschland ist das sächsische Erzgebirge. Von seinen natürlich vorkommenden Verbindungen sind der Wismutocker Bi_2O_3 und der Wismutglanz Bi_2S_3 zu erwähnen

3. Geschichte. Sichere Nachrichten über das Wismut stammen erst aus dem 15. Jahrhundert. Die ersten genauen Untersuchungen des Metalles wurden von Pott (1739) und Geoffroy (1753) ausgeführt; seine Reaktionen wurden dann von Bergman (1735 bis 1784) studiert.

4. Darstellung. Die ursprüngliche Darstellung des Metalles beschränkte sich darauf, durch Schmelzen bei niedrigen Temperaturen (Aussaigern) das freie Metall aus den grob gepochten Erzen zu gewinnen. Wegen seiner Unvollkommenheit ist heute dieser Prozeß durch ein Röstverfahren ersetzt worden. wodurch der in den Erzen enthaltene Schwefel und ein Teil des Arsens entfernt werden; der Röstrückstand wird dann mit Kohle, Eisen und Schlacke zusammengeschmolzen, wobei sich das Wismut im flüssigen Zustande unter einer festen, kobaltarsenidhaltigen Schicht ansammelt und abgestochen werden kann. Um ganz reines Wismut zu erhalten, schmilzt man das unreine Metall mit Oxydationsmitteln — z. B. dem zwanzigsten Teil seines Gewichtes an Kaliumnitrat — zusammen, wodurch Arsen, Schwefel, Selen und Tellur zu löslichen Verbindungen oxydiert werden, die mit Wasser auswaschbar sind.

5. Verwendung. Das Wismut und seine Verbindungen finden Verwendung in der Pharmazie und Kosmetik, zur Herstellung von Legierungen, zu thermoelektrischen Elementen und als Reagenzien.

6. Charakteristik. Das Wismut steht im periodischen System als Endglied der Stickstoffgruppe und zeigt als letztes Glied der Reihe mit dem höchsten Atomgewicht gemäß der allgemeinen Regel die basischen Eigenschaften am stärksten ausgeprägt. Es bildet daher hauptsächlich positive Ionen, von denen die dreiwertigen Bi···-Ionen vor allem bekannt sind. Derselben Wertigkeitsstufe gehört auch das sauerstoffhaltige Bismutylion BiO· an. Die geringe Elektroaffinität des Elementes zeigt sich darin, daß die den beiden Ionenarten entsprechenden Salze bereits durch Hydrolyse in schwer lösliche Verbindungen übergeführt werden. Komplexe Kationen (z. B. mit Ammoniak oder organischen Verbindungen) kommen vor; diese sind zum Teil stärker als die freien Metallionen, so daß die hydrolytische Fällung bei ihnen ausbleibt: so löst sich z. B. Wismutnitrat bei Gegenwart von Mannit klar in Wasser auf. Das Wismut kann auch als fünfwertiges Element (z. B. in den Verbindungen BiF_5 oder $BiCl_2(C_2H_5)_3$) und zweiwertig (z. B. BiO) fungieren; vielleicht tritt es außerdem auch noch in anderen Wertigkeitsstufen auf. Mit Wasserstoff vereinigt es sich entsprechend seiner vorwiegend metallischen Natur nicht mehr zu einer beständigen und wohldefinierten Verbindung; die Verbindungen mit Halogenen, Nitrat, Sulfat usw. besitzen die typischen Eigenschaften von Metallsalzen. Die stark metallische Natur des Wismuts zeigt sich auch in seiner Fähigkeit, Legierungen zu bilden.

7. Eigenschaften des Metalles. 7a) Physikalische Eigenschaften. Das Metall bildet rötlich-weiße, würfelähnliche Rhomboeder; es ist sehr spröde und läßt sich leicht pulvern. Die Dichte im festen Zustande ist zwischen 9,65 und 9,86 angegeben worden; der wahrscheinlichste Wert $d_{20/4}$ beträgt 9,7814. Schmelzpunkt etwa 270°. Spezifische Wärme bei 0° 0,0291, bei — 190° 0,0284. Das geschmolzene Wismut dehnt sich beim Erstarren stark aus, so daß die Dichte des flüssigen Metalles größer als die des festen ist; dieses Verhalten ist analog wie beim Wasser. Der Schwindungskoeffizient beim Schmelzen beträgt 0,29%. Siedepunkt 1420° bei einer Atmosphäre Druck, bei 16,5 Atmosphären 2060° und bei 102 mm 1200°. Der Wismutdampf besteht bei 1600 bis 1700° aus einem Gemenge von ein-und zweiatomigen Molekeln; bei 2100° sind fast nur noch einatomige vorhanden. In Quecksilber löst sich Wismut einatomig auf. Wismut leitet die Elektrizität sehr gut; wie bei allen Metallen steigt die Leitfähigkeit mit sinkender Temperatur. Aus noch nicht bekannten Ursachen besitzt Wismut gegen Wechselstrom einen anderen Widerstand als gegen Gleichstrom. Die Stellung des Wismuts in der Spannungsreihe ist nicht sicher bestimmt; wahrscheinlich steht es zwischen den unedleren Kupfer und Arsen einerseits und den edleren Antimon und Quecksilber anderseits. Wismut ist diamagnetisch; seine Suszeptibilität nimmt mit steigender Temperatur ab. Wismut hat ein charakteristisches Bogen-, Funken- und Flammenspektrum.

7b) Chemische Eigenschaften. Wismut ist bei gewöhnlicher Temperatur an der Luft unveränderlich; beim Erhitzen verbrennt es mit bläulicher Flamme zu Bi_2O_3. Es löst sich in Salpetersäure, Königswasser und heißer Schwefelsäure unter Salzbildung auf. Zinn, Zink, Eisen und einige andere Metalle fällen es aus seinen Salzlösungen aus.

7c) Modifikationsänderungen. Bringt man angeätztes Wismut mit unbearbeitetem Wismut bei höherer Temperatur in nahe Berührung, so wird das unbearbeitete

Metall körnig-kristallinisch, matt und zerfällt schließlich. Die gleiche Erscheinung wird bei vielen Metallen beobachtet und heißt „Forzierkrankheit“. Es handelt sich um den Uebergang des Metalles aus einem metastabilen in einen stabilen Zustand. — Auch durch sehr hohen Druck findet eine Aenderung der kristallinen Struktur des Wismuts statt.

7d) Kolloidales Wismut ist sowohl durch vorsichtige Reduktion von Wismutsalzen bei Gegenwart eines Schutzkolloides als auch durch elektrische Zerstäubung zu erhalten.

Das sogenannte amorphe Wismut von Hérard ist keine neue Wismutmodifikation sondern ein Gemisch von Wismut und Wismutoxyd.

8. Analytisches Verhalten. Besonders charakteristisch für $Bi^{\cdot\cdot\cdot}$-Ionen ist ihre Fällbarkeit durch Wasser, dessen Hydroxylionenkonzentration ausreicht, um das Löslichkeitsprodukt des Hydroxydes resp. einiger basischer Salze zu überschreiten. Zusatz von Säure hindert infolge Zurückdrängung der OH'-Ionenkonzentration die hydrolytische Fällung. Natürlich schlagen demnach alle, auch sehr schwache Basen Wismutsalzlösungen nieder. Das gefällte Hydroxyd ist in einem Ueberschuß des Fällungsmittels unlöslich. Schwefelionen (auch in der geringen Konzentration von Schwefelwasserstoff in saurer Lösung) liefern einen Niederschlag von braunem Bi_2S_3, das sich in verdünnter Salpetersäure löst. Gemäß seiner geringen Elektroaffinität bildet das Wismut auch mit vielen anderen Anionen schwer lösliche Verbindungen, z. B. mit J', CrO_4'', PO_4''', C_2O_4''. Wichtig zur Erkennung des Wismuts ist weiterhin der schwarze Niederschlag, der bei der Behandlung der Wismutsalze mit Stannosalzen in alkalischer Lösung entsteht. Zur quantitativen Bestimmung dient besonders die Wägung als Oxyd, als Sulfid (nach der Fällung mit Schwefelwasserstoff) und als Metall (nach der Reduktion mit Cyankalium oder Formaldehyd).

9. Legierungen. Das Wismut bildet mit zahlreichen Metallen beim Zusammenschmelzen Legierungen, von denen einige einen sehr niedrigen Schmelzpunkt besitzen und deshalb von praktischer Bedeutung sind. Dazu gehören besonders das Rosesche Metall, das aus 1 Teil Zinn, 1 Teil Blei und 2 Teilen Wismut besteht und einen Schmelzpunkt von 94° hat, und das Woodsche Metall mit dem Schmelzpunkte 71° aus 1 Teil Zinn, 1 Teil Cadmium, 2 Teilen Blei und 4 Teilen Wismut. Noch leichter schmelzbare Legierungen werden durch Zusatz von Quecksilber hergestellt. Wismut liefert mit Quecksilber sowie Kupfer oder Blei ein einfaches Eutektikum. Zwei flüssige Schichten bildet Wismut mit Silicium, Zink, Chrom, Eisen und Aluminium. Die Legierungen von Wismut und Zinn bieten das interessante Beispiel eines mechanischen Gemenges zweier fester Bestandteile. Mischkristalle entstehen aus Wismut mit Mangan, Nickel, Kobalt, Antimon, Thallium, Gold und Silber. Von chemischen Verbindungen sind beschrieben Na_3Bi, KBi_2, K_3Bi_2, K_3Bi, K_9Bi_7 (?), Bi_2Mg_3, Bi_5Tl_3, $BiTl_3$, Bi_3Ni, NiBi, MnBi; mit Calcium entsteht eine Verbindung von unbekannter Zusammensetzung. Bei der Mehrzahl dieser Verbindungen sind, wie das bei den binären Metallverbindungen im allgemeinen der Fall zu sein pflegt, die üblichen Wertigkeiten der Metalle nicht zu erkennen. — Obgleich Wismut stark diamagnetisch ist, sind die Mangan-Wismutlegierungen ferromagnetisch. Die Magnetisierbarkeit verschwindet bei 360 bis 380°.

10. Verbindungen, in denen das Wismut niedriger als dreiwertig erscheint. Solche sind häufig beschrieben aber auch eben so häufig bestritten worden. Diejenigen, welche die Existenz zweiwertiger Wismutverbindungen (Wismutoxydulverbindungen) anzweifelten, behaupteten, daß die geschilderten Stoffe, denen nach der Analyse die Formeln BiO, $BiCl_2$ usw. zukämen, Gemische von metallischem Wismut mit den dreiwertigen Verbindungen Bi_2O_3, $BiCl_3$ usw. in einem solchen Verhältnis wären, daß die Mengen der Elemente zufällig den Formeln der genannten Verbindungen entsprächen. — Wismutoxydul BiO, für das zahlreiche Darstellungsmethoden vorgeschlagen worden sind, wird am besten erhalten, wenn man Wismutoxyd in Salpetersäure löst, mit Kalilauge alkalisch macht und vorsichtig die berechnete Menge Zinnchlorürlösung hinzugibt, oder wenn man Wismutoxalat vorsichtig durch Erhitzen zersetzt. Das Wismutoxydul ist ein schwarzes Pulver vom spezifischen Gewicht 7,88 bis 7,90 bei Zimmertemperatur. Daß dieses Präparat, das nach der Analyse genau die Formel BiO hat, kein Gemenge von $Bi + Bi_2O_3$ sein kann, geht daraus hervor, daß die Verbindung ein anderes spezifisches Gewicht (7,9) hat, als sich für das Gemenge berechnen läßt (8,85). — Weniger gesichert ist die Existenz anderer Oxydulverbindungen. Stoffe von der Formel $BiCl_2$, $BiBr_2$, BiJ_2 entstehen durch Zusammenschmelzen von Wismut mit $BiCl_3$, $BiBr_3$, BiJ_3; doch ist hier der durch Aufnahme eines Schmelzdiagrammes versuchte Nachweis, daß es sich um wirkliche chemische Verbindungen des zweiwertigen Wismuts handelt, mit dem Hinweis auf Versuchsfehler durch Unterkühlung bestritten worden. Daß die spezifischen Gewichte der durch Zusammenschmelzen erhaltenen Präparate andere sind, als sich aus

den Komponenten berechnen läßt, was auch als Beweis für die Existenz der Verbindungen $BiCl_2$, $BiBr_2$, BiJ_2 angeführt wurde, soll nach der anderen Auffassung durch die thermisch nachweisbare Bildung von Wismutmonochlorid BiCl usw. seine Erklärung finden. — Für die Existenz eines Sulfürs BiS lassen sich keine stichhaltigen Gründe angeben.

11. Verbindungen, in denen das Wismut dreiwertig erscheint. (Wismut(III)-Verbindungen). Wismuthydrür. Wegen seines ausgeprägt metallischen Charakters kann das Wismut mit Wasserstoff keine beständige Verbindung liefern. Beim Erhitzen von BiK_3 im Wasserstoffstrom auf 700° verdampft das Kalium und es bleibt ein graues amorphes Pulver zurück, das annähernd der Zusammensetzung BiH_3 entspricht und in Sauerstoff zu Wismutoxyd und Wasser verbrennt. Ob hier aber wirklich das Wismuthydrür vorliegt oder der Wasserstoff nur occludiert ist, bleibt fraglich. Dagegen sind Wismutalkyle BiR_3 (worin R ein organisches Radikal bedeutet) wohl bekannt.

Wismutfluorid BiF_3. Das Wismutfluorid entsteht durch Auflösen von Wismutoxyd in Flußsäure und so lange fortgesetztes Eindampfen der Lösung, bis keine Flußsäure mehr entweicht, oder durch Fällung einer möglichst säurefreien Wismutnitratlösung mit Fluorkalium. Das Fluorid ist ein grauweißes, kristallinisches Pulver, das in Wasser nicht merklich löslich ist und von ihm nicht angegriffen wird. Wenn bei der ersten Darstellungsmethode nur ganz wenig eingedampft wird, so resultiert ein Körper, dem nach seinem Wismutgehalt die Formel H_3BiF_6 zukommt. Diese Verbindung ist zerfließlich und wird durch Wasser zersetzt. Dem Bau nach muß dieser Stoff als eine komplexe Wismutfluorwasserstoffsäure angesehen werden; doch sind Salze dieses Typus nicht bekannt. Die Neigung zur Komplexbildung kommt auch bei der Bildung der Verbindung NH_4BiF_4 zum Ausdruck, die durch Auflösen von Wismuthydroxyd in heißer Fluorammoniumlösung entsteht. Nach längerem Stehen scheidet sich das Salz aus der Lösung in kleinen, hellen, glänzenden Kristallen ab, die durch Wasser und Säure unter Abgabe von Flußsäure zersetzt werden. Auch Wismutoxyfluorid BiOF ist bekannt.

Wismutchlorid $BiCl_3$. Wismut und Chlor vereinigen sich direkt miteinander; durch Antimon verunreinigtes Metall entzündet sich sogar bei dieser Reaktion. In Salzsäure löst sich das Metall nur bei Luftzutritt; dagegen löst es sich leicht in Königswasser unter Chloridbildung. Schließlich entsteht das Chlorid aus Wismutoxyd und Salzsäure. Beim Abdampfen dieser Lösungen und Destillieren des Rückstandes unter Luftabschluß geht reines Wismutchlorid über. In einem schwachen Chlorwasserstoffstrome verflüchtigt sich Wismutoxyd bei 130° vollständig als Chlorid. $BiCl_3$ ist eine weiße kristallinische Masse, die bereits bei 224° schmilzt und deshalb Wismutbutter genannt wird. Siedepunkt 447°. Dichte bei 18° 4,48. Dampfdichte der Formel $BiCl_3$ gemäß. Wismutchlorid wird durch Licht etwas zersetzt, was sich durch das Auftreten einer dunkleren Farbe zu erkennen gibt und besonders auf geleimtem, mit Wismutchlorid getränktem Papier zu beobachten ist; im Dunklen verschwindet die Graufärbung wieder. An feuchter Luft ist das Chlorid zerfließlich und wird durch Wasser in unlösliches Oxychlorid verwandelt: $BiCl_3 + H_2O = BiOCl + 2HCl$. Daher reagiert Wismutchlorid in Berührung mit Wasser stets sauer. Die Wärmetönung der Hydrolyse beträgt pro Mol $BiCl_3$ 7830 cal. Die hydrolytische Spaltung erfolgt nach den Forderungen des Massenwirkungsgesetzes. Die fällende Wirkung des Wassers wird durch Zusatz von Chloriden verringert, was auf die Bildung stärkerer und deswegen löslicherer Komplexionen deutet. Beim Einengen einer Lösung von Wismutoxyd in Salzsäure kristallisiert das Hydrat $BiCl_3 \cdot 2H_2O$ aus. — Das Wismutchlorid vermag zahlreiche komplexe Verbindungen zu bilden. Wahrscheinlich beruht die Tatsache, daß Wismutchlorid sehr reichlich Ammoniak löst, auf der Bildung von Wismutammoniakkomplexen. Auch mit organischen Basen (Anilin, Chinolin) sind Komplexverbindungen hergestellt worden, ebenso wie mit Phenylhydrazin, Stickoxyden und Salzsäure. Besonders die Komplexbildung mit Salzsäure ist wichtig. Aus einer Lösung von $BiCl_3$ in Salzsäure entsteht eine kristallinische Verbindung $HBiCl_4$. Doch ist die Zahl der komplexen Chlorwismutsäuren viel größer, wie aus der Existenz zahlreicher Salze hervorgeht, die hauptsächlich nach dem Schema $HBiCl_4$ oder H_2BiCl_5 gebaut sind, bei denen jedoch auch noch andere Typen beschrieben werden. — Durch Wasser entsteht aus dem Chlorid das Wismutoxychlorid BiOCl, das nach der Fällung ein weißes kristallinisches Pulver darstellt, welches beim Erhitzen gelb bis braun wird; nach dem Erkalten verschwindet diese Färbung nur zum Teil wieder. Das Oxychlorid sublimiert beim Erhitzen ein wenig und setzt sich an den kälteren Gefäßteilen in kleinen, glänzenden Kristallen ab. In schön ausgebildeten tetragonalen Kristallen vom spezifischen Gewicht 7,717 gewinnt man das Oxychlorid, wenn man das aus einer Lösung von Wismutoxyd in Salzsäure durch Wasser gefällte Pulver durch Erwärmen nochmals löst und abkühlen läßt. Das Oxychlorid ist in Seignettesalzlösung —

wohl unter Komplexbildung — sowie in Salz- und Schwefelsäure leicht löslich, während Salpetersäure es nur in der Wärme löst. Mit Laugen wird es bis zu einem Gleichgewicht unter Bildung von Wismuthydroxyd zersetzt. Noch andere beschriebene Oxychloride (z. B. $Bi_3O_2Cl_3$ oder $Bi_4Cl_4O_3$) sind wahrscheinlich Gemenge von Oxyd, Chlorid und Metall. — Das Wismutoxychlorid wird als Schminke benutzt.

Wismutbromid $BiBr_3$. Das Wismutbromid ist dem Chlorid sehr ähnlich. Es wird hauptsächlich durch Einwirkung von Brom auf das Metall dargestellt. Gelbe glänzende Kristalle vom spezifischen Gewicht 5,604 und dem Schmelzpunkte 219°. Die rote Schmelze hat das spezifische Gewicht 5,4 und siedet bei 453°. Der Dampf ist tiefrot. Die Fähigkeit zur Komplexbildung ist der des Chlorids ganz analog. Mit Wasser entsteht das Wismutoxybromid BiOBr.

Wismutjodid BiJ_3. Infolge der geringeren chemischen Verwandtschaft ist das Jodid aus den beiden Elementen schwer zu gewinnen; doch gelingt seine Darstellung durch Erhitzen der beiden Elemente im Kohlendioxydstrome oder durch Eintragen kleiner Portionen Jod in stark erhitztes Wismut. Das Jodid ist auch durch Fällung von Wismutionen mit Jodionen herstellbar. Ganz reines Wismutjodid erhält man, wenn man eine mit Salzsäure gesättigte Lösung von Stannochlorid in Salzsäure mit Jod sättigt und mit Wismutoxyd oder -oxychlorid versetzt. Schwarzgraue, glänzende Kristalle. Ebenso sieht auch das auf trockenem Wege gewonnene nicht ganz reine Jodid aus, während das gefällte einen mehr braunen kristallinischen Niederschlag vorstellt. Dichte 4,64 bis 4,65. Der Schmelzpunkt liegt bei 439°, und bei höherer Temperatur erfolgt Verflüchtigung als rotbrauner Dampf. Die Neigung zur Bildung komplexer Verbindungen ist entsprechend wie bei den anderen Wismuthaloiden ausgebildet. Wismutjodidjodwasserstoffsäure wird als Alkaloidfällungsmittel benutzt. Von kaltem Wasser wird das Jodid nur schwer angegriffen, dagegen entsteht durch heißes Wasser Oxyjodid. Das normale Wismutoxyjodid BiOJ ist rot; außerdem gibt es noch ein schwarzes von der Formel $Bi_2O_3.5HJ$. Das rote Oxyjodid entsteht auch durch Umsetzung von Bismutylnitrat mit Jodkalium und findet wegen seiner antiseptischen Eigenschaften unter dem Namen Bismutum oxyjodatum arzneiliche Verwendung.

Wismutoxyd Bi_2O_3 entsteht beim Verbrennen das Metalles an der Luft oder beim Glühen von basischem Wismutnitret, basischem Wismutkarbonet und W muthydroxyd. Von Wismutoxyd sind verschiedene Modifikationen bekannt. Beim Abkühlen des geschmolzenen Oxyds ergibt sich der Beginn der Kristallisation bei 820° und ein Umwandlungspunkt bei etwa 704°; für eine dritte kristallinische Modifikation, die wahrscheinlich noch existiert, ist ein Umwandlungspunkt nicht nachweisbar gewesen. Je nach der Darstellung wechseln infolge der Existenz der verschiedenen Modifikationen, der möglichen Unterkühlungserscheinungen und der Tatsache, daß geringe Mengen von Verunreinigungen nur schwer aus dem Oxyd zu entfernen sind, die beschriebenen Eigenschaften des Oxyds ein wenig. Es wird als gelbes amorphes Pulver oder in kleinen gelben glänzenden Kristallen beschrieben. Dichte ca. 8,5. In der Hitze wird das Oxyd rot und verflüchtigt sich bei sehr hoher Temperatur. Seine Bildungswärme aus den Elementen beträgt 137,8 cal. Das Wismutoxyd besitzt elektrische Leitfähigkeit, die zum Teil elektrolytischer Natur ist. Das Oxyd ist in Säuren löslich und läßt sich durch zahlreiche Reduktionsmittel in Metall verwandeln. Das Hydrosol des Wismutoxyds entsteht bei der Dialyse von Wismutnitratlösungen als eine im auffallenden Lichte schwach opaleszierende Flüssigkeit. Auch bei Verwendung von Eiweiß und Glyzerin als Schutzkolloiden läßt sich das Wismuthydroxydhydrosol gewinnen. Durch Eindampfen der von Elektrolyten möglichst befreiten Lösung erhält man das feste Hydrosol.

Wismuthydroxyde. Die durch Fällung aus Wismutsalzen durch Hydroxylionen entstehenden Niederschläge sind meist kein reines Hydroxyd, sondern basische Salze. Das reine Orthohydroxyd $Bi(OH)_3$ entsteht durch Lösen von Wismutnitrat in wässerigem Glyzerin, Alkalisieren mit Kalilauge und Neutralisieren der Hauptmenge der freien Base mit Essigsäure oder durch Eingießen von Wismutnitratmannitlösung in eiskalte Kalilauge und annähernde Neutralisation mit Schwefelsäure. Nach dem Dekantieren hinterbleibt das Hydroxyd in gallertiger Form und wird beim Auswaschen mit kaltem Wasser kristallinisch. In Säuren ist das Hydroxyd gut löslich und in starken Laugen in nicht unbeträchtlicher Menge. Beim Trocknen entsteht leicht das Wismutmetahydroxyd BiOOH. Auch bei der Behandlung mit kalten Laugen wird das Orthohydroxyd teilweise anhydrisiert und in Metahydroxyd verwandelt. Während das auf trockenem Wege hergestellte Metahydroxyd weiß und beständig ist, ist das nach der letzt erwähnten Methode erhaltene gelblichweiß, kristallinisch und wird am Licht oder bei langsamer Erwärmung grau. Es scheint also mehrere Modifikationen von Metahydroxyd zu geben.

Wismutsulfid Bi_2S_3 wird durch Zusammenschmelzen oder sehr starkes Zusammendrücken der beiden Elemente sowie durch Fällen von Wismutionen mit Schwefelionen dargestellt. Das auf trockenem Wege gewonnene Sulfid bildet bleigraue Kristalle vom spezifischen Gewichte 6,1 bis 6,5; das gefällte Sulfid ist ein schwarzes amorphes Pulver von der Dichte 7,001. Amorphes Wismutsulfid ist merklich in Schwefelkalium und Schwefelnatrium unter Bildung von Sulfosalzen ($Bi_2S_3 . 4K_2S$) löslich. Außerdem erhält man Sulfosalze beim Zusammenschmelzen von Wismut mit Alkalikarbonat und Schwefel, von Wismutperoxyden mit Schwefelalkali oder durch längeres Erhitzen von Wismutoxyd mit Rhodankalium. Auch gewisse Mineralien, wie Kupferwismutglanz $CuBiS_2$ oder Bleibismutit $Pb_2Bi_2S_5$ lassen sich als Salze einer Wismutsulfosäure auffassen. Dem Bismutyl BiO entspricht der Rest BiS, demgemäß auch Verbindungen wie BiSCl gebaut sind. Durch Einwirkung von Schwefelwasserstoff auf eine sehr stark verdünnte Wismutnitratlösung und darauf folgende Dialyse oder bei der Behandlung von Wismutoxydhydrosol mit Schwefelwasserstoff entsteht das Hydrosol des Wismutsulfids.

Wismutselenid Bi_2Se_3 kommt in der Natur vor und ist auch aus den Elementen zu gewinnen.

Wismuttellurid Bi_2Te_3 ist als Mineral bekannt und auch durch Zusammenschmelzen der Elemente zu erhalten. Außerdem existieren Gemische von Wismut und Tellur in allen Verhältnissen.

Wismutsulfat. Das normale Salz $Bi_2(SO_4)_3$ entsteht durch Auflösung von metallischem Wismut in Schwefelsäure unter SO_2-Entwickelung, von Wismutoxyd in verdünnter oder Wismutsulfid in konzentrierter Schwefelsäure oder durch Eindampfen des Nitrats mit Schwefelsäure. Weiße, feine, sehr hygroskopische Nadeln. Außerdem sind die kristallwasserhaltigen Verbindungen $Bi_2(SO_4)_3 . 3H_2O$ und $Bi_2(SO_4)_3 . 3^1/_2H_2O$ beschrieben worden. Zahlreiche basische und saure Salze, deren Formeln in der Literatur angegeben werden, sind wohl zum Teil als Gemenge von Sulfat, Oxyd und Wasser in wechselnden Verhältnissen anzusehen. Mit Alkalisulfaten entstehen Doppelsalze, von denen die Verbindung $KBi(SO_4)_2$ ein kristallwasserfreier Wismutalaun ist.

Wismutnitrat. Beim Auflösen von Wismut in Salpetersäure und Eindampfen der Lösung bis zur Kristallisation entsteht das salpetersaure Wismut $Bi(NO_3)_3 . 5H_2O$ in großen säulenförmigen Kristallen. Das Salz ist in Salpetersäure löslich und wird aus seiner Lösung durch Wasser als basisches Salz gefällt, indem Salpetersäure frei wird, z. B. $Bi(NO_3)_3 + H_2O = 2HNO_3 + BiONO_3$. Die Zusammensetzung des Niederschlages hängt von der Menge und Temperatur des zugesetzten Wassers ab. Es wird nicht das gesamte Wismut abgeschieden, sondern es bildet sich in der Lösung ein Gleichgewichtszustand, der dadurch charakterisiert ist, daß durch die Wasserstoffionen der vorhandenen freien Säure die Hydroxylionenkonzentration des Wassers so klein gemacht wird, als zur Erreichung des Löslichkeitsproduktes des basischen Salzes erforderlich ist. Die Hydrolyse wird durch Zusatz organischer hydroxylhaltiger Stoffe wie Rohrzucker oder Mannit wahrscheinlich infolge Komplexionenbildung zurückgedrängt. Das basische Wismutnitrat (Magisterium Bismuti) wird als Medikament und Schminke viel verwendet. Es ist ein weißes geschmackloses, unter dem Mikroskop in kleine Kriställchen auflösbares Pulver. Seine Zusammensetzung schwankt, wie aus dem Vorhergehenden folgt, nach der Art der Darstellung, und die Arzneibücher der verschiedenen Länder geben daher für die Bereitung des Medikamentes ganz bestimmte genaue Vorschriften an. Durch eine phasentheoretische Untersuchung ist die Existenz folgender Hydrate und basischer Salze sichergestellt: $Bi(NO_3)_3 . 5H_2O$; $Bi(NO_3)_3 . 2H_2O$; $Bi(NO_3)_3 . 1^1/_2H_2O$; $Bi_2O_3 . N_2O_5 . 2H_2O$; $Bi_2O_3 . N_2O_5 . 1H_2O$; $6Bi_2O_3 . 5N_2O_5 . 8(9)H_2O$; $2Bi_2O_3 . N_2O_5 . H_2O$; wahrscheinlich sind auch noch die Verbindungen $Bi_2O_3 . 2N_2O_5 . 2H_2O$; $10Bi_2O_3 . 9N_2O_5 . 7(8)H_2O$. — Wismutnitrat kann mit vielen Nitraten zweiwertiger Metalle Doppelsalze von der Formel $Me(NO_3)_2 . Bi(NO_3)_3 . 12H_2O$ bilden.

12. Verbindungen, in denen das Wismut höher als dreiwertig erscheint. Von den hierher gehörigen Verbindungen ist besonders über die Wismutperoxyde viel gearbeitet worden. Oxyde von einem höheren Sauerstoffgehalt, als es der Dreiwertigkeit des Wismuts entspricht, entstehen durch Einwirkung von Oxydationsmitteln auf Wismutverbindungen. Dazu können Kaliumpersulfat, Ferricyankalium, Kaliumchlorat, Hypochlorite, Wasserstoffsuperoxyd usw. oder der elektrische Strom benutzt werden; am wichtigsten ist die Methode, Chlor in Kalilauge einzuleiten, in der Wismuthydroxyd suspendiert ist. Als Vertreter der Peroxyde sind beschrieben worden: das Tetroxyd $Bi_2O_4(BiO_2)$ und Hydrate davon, das Pentoxyd Bi_2O_5 mit seinem Hydrat $HBiO_3$ (die sogenannte Wismutsäure, deren Säurecharakter aber keineswegs gesichert ist), sowie Bi_2O_7 und Bi_4O_9. Die kritische Betrachtung des vorliegenden Tatsachenmateriales weist darauf hin, daß noch niemals ein Peroxyd von konstanter Zusammensetzung

hergestellt worden ist und daß die genannten Formeln daher unbewiesen sind, wenn auch die Existenz von Bi_2O_5 als recht wahrscheinlich angesehen werden kann. Die bekannten Peroxyde des Wismuts scheinen zwei Klassen anzugehören, 1. die hellbraun gefärbten, die in heißer konzentrierter Salpetersäure völlig löslich sind, und 2. die dunkel rotbraun gefärbten, die mit heißer konzentrierter Salpetersäure scharlach- bis gelbrot werden (hierher gehört die Wismutsäure).

Auch höherwertige Haloide sind beschrieben worden. Wismuttetrachlorid $BiCl_4$ soll nach dem Schmelzdiagramm aus $BiCl_3$ und flüsssigem Chlor als endotherme Verbindung entstehen. Wismutpentafluorid BiF_5 und Wismutoxytrifluorid $BiOF_3$. Löst man das Gemisch aus Wismutoxyden, das bei der Einwirkung von Chlor auf eine Suspension von Wismuthydroxyd in Kalilauge entsteht, in konzentrierter Flußsäure, so entsteht eine Lösung, die wahrscheinlich das Pentafluorid und das Oxytrifluorid enthält. Beim Eindampfen hinterbleibt ein braunes Oxytrifluoridgemisch; beim Zusatz von Fluorkalium lassen sich die Oxyfluoridkomplexsalze $Bi_3O_4F_7 . 3KF$ und $BiOF_3 . 3KF$ (farblose Kristalle) isolieren. Das Oxyfluorid zerfällt explosionsartig in BiF_3 und Sauerstoff.

Literatur *s. bei „Tantal".*

W. Herz.

β) Vanadium.

Vanadin. V. Atomgewicht 51,0.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung. 5. Verwendung. 6. Charakteristik. 7. Eigenschaften des Metalles. 8. Analytisches Verhalten. 9. Verbindungen, in denen das Vanadin zweiwertig erscheint. 10. Verbindungen, in denen das Vanadin dreiwertig erscheint. 11. Verbindungen, in denen das Vanadin vierwertig erscheint. 12. Verbindungen, in denen das Vanadin fünfwertig erscheint.

1. Atomgewicht. Die internationale Atomgewichtskommission gibt als Atomgewicht des Vanadins für 1912 die Zahl 51,0 an; die Unsicherheit beginnt in der ersten Dezimalen. Dieser Wert ist in Uebereinstimmung mit der Regel von Avogadro (Dampfdichte von VCl_4 und $VOCl_3$), der Regel von Dulong und Petit und dem periodischen System der Elemente.

2. Vorkommen. Eigentliche Vanadinmineralien sind nicht häufig; die meisten sind Salze der Vanadinsäure, von denen der Vanadinit, ein Chlorbleivanadat, das wichtigste ist. Außerdem kommt aber das Vanadin in sehr vielen Mineralien in geringen Mengen vor, so daß seine extensive Verbreitung ungemein groß ist. Spektralanalytisch ist das Vanadium auch auf der Sonne sowie in zahlreichen Meteoriten nachweisbar. Das Blut der Ascidien ist vanadinhaltig.

3. Geschichte. Das Vanadin wurde 1801 von Del Rio in einem mexikanischen Bleierz aufgefunden und als Erythronium bezeichnet. Später wurde aber seine Existenz auch vom Entdecker bezweifelt, und das Erythronium geriet in Vergessenheit. 1830 entdeckte Sefström in einem schwedischen Eisen ein neues Element, das er Vanadium nannte, und dessen Identität mit dem Erythronium bald darauf erkannt wurde.

4. Darstellung. Eine allgemeine Methode zur Darstellung der Vanadinsäure besteht darin, daß man die vanadinhaltigen Mineralien mit Salpeter (auch unter Zusatz von Natriumkarbonat) aufschließt. Das gebildete Alkalivanadat ist in Wasser löslich und wird durch Auslaugen der Schmelze gewonnen. Nachdem man die vorhandenen Verunreinigungen, wie Tonerde oder Kieselsäure, entfernt hat, wird durch Chlorammonium schwer lösliches kristallisiertes Ammoniumvanadat ausgefällt. Durch Erhitzen entsteht daraus Vanadinpentoxyd V_2O_5, welches das Ausgangsmaterial für die anderen Vanadinverbindungen ist. — Ganz reines metallisches Vanadin erhält man nur sehr schwer aus seinen Verbindungen, so daß diese Reindarstellung erst vor kurzem gelungen ist. Durch Reduktion von VCl_2 mit Wasserstoff bei Rotglut entsteht ein Produkt, das hauptsächlich aus Vanadin besteht, daneben aber stets Wasserstoff (bis 1,3%) und einige Prozente Oxyd enthält. Auch im elektrischen Ofen durch Kohle ist kein reines Vanadium herstellbar, sondern das beste Präparat enthält noch fast 2% Kohle. Dagegen gelingt die Darstellung des reinen Metalls durch Reduktion von V_2O_5 nach dem Goldschmidtschen Verfahren und zwar am besten, wenn eine Legierung der Cerit- und Ytteritmetalle (sogenanntes Mischmetall) als Reduktionsmittel benutzt wird. Auch ist reines Metall durch Elektrolyse von V_2O_3 im Vakuum zu gewinnen.

5. Verwendung. Vanadinsäure dient als Katalysator bei Oxydationsvorgängen, z. B. in der Anilinfarbentechnik, um die Oxydation des Anilins in Anilinschwarz zu beschleunigen; aus demselben Grunde ist es auch bei der Kjeldahlschen Stickstoffbestimmungsmethode empfohlen worden. Diese Fähigkeit des V_2O_5 beruht auf der Abgabe von Sauer-

stoff unter Bildung von V_2O_4, das sich wieder in das Pentoxyd zurückverwandelt. Das Vanadin spielt auch in der Metallurgie eine bemerkenswerte Rolle, da ein Zusatz zu Stahl dessen mechanische Eigenschaften wesentlich verbessert.

6. Charakteristik. Das Verhalten des Vanadins entspricht seiner Stellung im periodischen System. Es gehört als erstes Glied der Nebenreihe zur fünften Gruppe und zeigt deshalb die Maximalvalenz fünf. In dieser Stufe ist der saure Charakter des Elementes deutlich durch die Existenz der Vanadinsäure ausgesprochen, die z. B. der Phosphorsäure recht analog ist; doch ist die Säurenatur schwächer. Die geringere Elektroaffinität kommt auch in der Bildung vieler komplexer Vanadinatanionen zum Ausdruck. Die Vanadate ähneln in Aussehen und Vorkommen außerdem den Chromaten und Titanaten, was der Tatsache gemäß ist, daß das Vanadium in der Horizontalreihe zwischen Titan in der vierten und Chrom in der sechsten Gruppe des periodischen Systems steht.

Das Vanadin bildet in großer Zahl auch Verbindungen, in denen es vierwertig erscheint; das ist in diesem Maße bei den Homologen des Stickstoffs (in der fünften Gruppe des periodischen Systems) nicht der Fall und zeigt wieder die Aehnlichkeit des Vanadins mit dem Titan. In den vierwertigen Verbindungen ist das Vanadin sowohl sauren als auch basischen Charakters. Die Salze der vanadigen Säure gehen leicht in solche der Vanadinsäure über. Dieser Wertigkeitsstufe entspricht das Vanadylion $VO^{\cdot\cdot}$.

Die Verbindungen, in denen das Vanadin dreiwertig ist, unterscheiden sich von den dreiwertigen Verbindungen der Elemente der Stickstoffreihe prinzipiell dadurch, daß in ihnen das Vanadin ausgesprochen metallisch ist. Daher fehlt auch eine Wasserstoffverbindung VH_3. Die Elektroaffinität des grünen dreiwertigen $V^{\cdot\cdot\cdot}$-Ions ist nicht sehr groß, wie seine leichte Oxydierbarkeit und die Bildung zahlreicher komplexer Ionen beweist. Die Existenz des Vanadinalauns zeigt die Analogie zum Chrom.

In den zweiwertigen Vanadiumverbindungen ist der metallische Charakter noch stärker ausgeprägt, wie z. B. die Bildung von Mischkristallen von VSO_4 mit $FeSO_4$ und $MgSO_4$ anzeigt. Analog wie die Chromosalze haben auch die zweiwertigen Vanadinverbindungen ein sehr großes Reduktionspotential, so daß ihre wässerigen Lösungen sich von selbst unter Wasserstoffentwickelung zersetzen.

Verbindungen, in denen das Vanadin einwertig ist — z. B. ist das Oxyd V_2O beschrieben worden — sind zweifelhaft.

7. Eigenschaften des Metalles. Da das Vanadin erst seit kurzem in reinem Zustande bekannt ist, sind die älteren Angaben über das Metall unzuverlässig.

7a) Physikalische Eigenschaften. Das reine Metall stellt einen weißen Regulus vor, an dem hexagonal-rhomboedrische Kristallflächen auftreten. Stark glänzend. Sehr hart (härter wie Quarz und Stahl) und ziemlich spröde. Dichte bei 18,7° 5,6880. Spezifische Wärme 0,1240. Schmelzpunkt 1715°. Vanadin ist paramagnetisch. Der Brechungsindex beträgt 3,03, der Absorptionskoeffizient 3,51, das Reflexionsvermögen 57,5% gegen gelbes Licht. Verbrennungswärme $(2V + 5O = V_2O_5)$ pro Grammatom 125250 g-cal (nach allerneuesten Untersuchungen noch erheblich höher). Schmelzendes Vanadium löst seine niedrigeren Oxyde zu Lösungen auf, die schwerer schmelzen als das Metall, was ein Grund für die bereits betonte Schwierigkeit zu seiner Reindarstellung ist.

7b) Chemische Eigenschaften. Bei gewöhnlicher Temperatur ist Vanadin an der Luft beständig; in der Hitze wird es bis zu V_2O_5 oxydiert. Bromwasser, Kalilauge, Salzsäure und kalte Schwefelsäure greifen es nicht an, wohl aber lösen es Flußsäure und konzentrierte Schwefelsäure in der Hitze, sowie Salpetersäure und Königswasser bereits in der Kälte. Vanadin reduziert die Haloidsalze von Quecksilber, Kupfer und Eisen in die niedrigeren Oxydationsstufen und schlägt die Metalle aus Gold-, Silber- und Platinsalzlösungen nieder. Mit vielen Metallen (Eisen, Nickel, Kobalt, Kupfer, Aluminium, Zinn, Platin) bildet das Vanadin Legierungen; mit Eisen entsteht eine ununterbrochene Reihe von Mischkristallen. Bei hoher Temperatur reagiert Vanadin mit Silicium, Phosphor, Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff. Bei 1300° absorbiert es über 16% Wasserstoff und bildet eine schwarze pulvrige Masse, die aber wahrscheinlich keine Verbindung sondern eine Adsorption ist.

7c) Kolloidales Vanadin ist durch elektrische Zerstäubung herstellbar.

8. Analytisches Verhalten. Durch Reduktionsmittel (z. B. schweflige Säure) werden Vanadinverbindungen zu blauem Vanadylsalz reduziert; Metalle wie Zink, Aluminium, Cadmium führen die Reduktion noch weiter, was man an der schließlichen Violett- und Grünfärbung der Lösung erkennt. Sehr charakteristisch ist die Rotbraunfärbung, welche beim Schütteln einer sauren Vanadinsäurelösung mit Wasserstoffsuperoxyd entsteht. Schwefelammonium fällt Vanadin nicht, sondern bildet Sulfosalze, welche sich mit kirschroter Farbe lösen; beim Ansäuern fällt rotbraunes Vanadinsulfid aus. Alkali-

vanadate geben ein schwer lösliches Ammoniumsalz NH_4VO_3. Zur quantitativen Bestimmung dienen die Fällungen mit Mercuronitrat (Glühen des ausgewaschenen Niederschlages und Wägen des V_2O_5) oder Bleiacetat (Lösung des Bleiniederschlages, Zersetzung durch Schwefelsäure oder Schwefelwasserstoff und Wägung als V_2O_5 nach Eindampfen des Filtrates).

9. Verbindungen, in denen das Vanadium zweiwertig erscheint (Vanado-, Vanadin (II) - Verbindungen). Verbindungen dieser Stufe entstehen auf trockenem Wege durch Reduktion der höherwertigen Vanadinverbindungen mit Wasserstoff oder auch auf nassem Wege durch energische, am besten elektrolytische Reduktion.

Beim Zusammenschmelzen von Ammoniumvanadat mit Aluminium und Kaliumsiliciumfluorid entsteht ein Vanadiumaluminiumsilicid $V_8Al_2Si_{13}$ in schön ausgebildeten hexagonaten harten Kristallen vom spezifischen Gewicht 4,3. Das Vanadium scheint hier zweiwertig zu sein, denn diese Verbindung gibt mit Flußsäure Vanadofluorid VF_2 in rotvioletter Lösung, die bei Luftzutritt oder mit überschüssiger Flußsäure VF_3 liefert.

Vanadochlorid VCl_2 — beim Durchleiten eines Gemenges von Wasserstoff und VCl_4-Dampf durch ein dunkelrot glühendes Glasrohr, durch Einwirkung von Chlor auf Vanadinsilicid oder durch Erhitzen von VCl_3 in Stickstoff entstehend — bildet hellgrüne, glänzende, hexagonale Tafeln vom spezifischen Gewicht 3,23 bei 18°. Sehr hygroskopisch. Löslich in Wasser mit violetter, in Alkohol mit blauer. in Aether mit grün-gelber Farbe.

Vanadosulfat $VSO_4.7H_2O$ wird durch elektrolytische Reduktion gewonnen. Violette, dem Eisenvitriol isomorphe Kristalle, die an der Luft nicht haltbar sind. In Wasser leicht löslich und leicht oxydabel. Bildet mit Alkalisulfaten Doppelsulfate.

Vanadinoxydul (Vanadyl) VO. Durch Reduktion der Oxychloride $VOCl_3$ oder VOCl oder des Oxyds V_2O_5 darstellbar. Schweres schwarzes Pulver, das die Elektrizität leitet und metallischen Glanz annehmen kann. Spezifisches Gewicht 5,785. In Säuren mit blauer Farbe löslich. Wurde von Berzelius für das Metall gehalten.

Vanadosulfid. VS entsteht durch Reduktion von V_2S_3 oder aus VO durch Schwefelwasserstoff.

Vanadokarbid $V_2C(V_4C_2)$ zeigt den Schmelzpunkt 2750°.

10. Verbindungen, in denen das Vanadium dreiwertig erscheint (Vanadi-, Vanadin(III)-Verbindungen). Diese grünen Verbindungen entstehen durch Reduktion der höherwertigen; die sauren Lösungen von V_2O_5 lassen sich am besten durch Magnesium oder elektrolytische Behandlung an platinierten Platin- oder in schwefelsaurer Lösung an Bleielektroden reduzieren.

Vanadifluorid VF_3 entsteht aus dem entsprechenden Chlorid durch wasserfreie Flußsäure bei dunkler Rotglut. Gelbgrün, fast unlöslich in Wasser; Schmelzpunkt über 800°; sublimiert bei Rotglut. Dichte 3,363. Durch Eindampfen der wässerigen Lösung von $V(OH)_3$ in Flußsäure erhält man $VF_3.3H_2O$. Leicht verwitternde Rhomboeder. Die wässerige Lösung ist hydrolysiert. Mit anderen Fluoriden bilden sich zahlreiche Komplexe.

Vanadichlorid VCl_3. Durch Reduktion von VCl_4 mit Wasserstoff (neben VCl_2) oder Schwefel, durch Zersetzung von VCl_4, aus $VOCl_3$ und Schwefel herstellbar. Glänzende, rötliche, hygroskopische Kristalle. Dichte 3,00 bei 18°. Löslich in organischen Lösungsmitteln. Die wässerige Lösung ist hydrolysiert und oxydabel; aus ihr scheidet sich $VCl_3.6H_2O$ ab. Durch nicht zu starkes Erhitzen von VCl_3 im Kohlendioxydstrom oder aus $VOCl_3$ und Wasserstoff entsteht Vanadiumoxymonochlorid VOCl als braune kristallinische Masse. Analog sind das Bromid und Jodid.

Vanadihydroxyd $V(OH)_3$ fällt als unbeständiger, flockiger, grüner Niederschlag beim Versetzen einer Trichloridlösung mit Lauge. Vanadioxyd V_2O_3 wird gewonnen durch Reduktion von V_2O_5 oder $VOCl_3$ bei hoher Temperatur, durch Erhitzen von VOBr oder durch Zersetzung von Ammoniumvanadat bei Gegenwart reduzierender Stoffe. Schwarze glänzende Kristalle. Als Pulver graphitähnlich. Dichte bei 18° 4,87. Unschmelzbar. Leiter der Elektrizität. An der Luft bei gewöhnlicher Temperatur geht es langsam in blaues VO_2 über. Es ist nur in Flußsäure und Salpetersäure (vielleicht auch Salzsäure?) löslich.

Vanadisulfid V_2S_3 entsteht beim Erhitzen von V_2O_3 im Schwefelwasserstoffstrom oder durch Einwirkung eines Gasgemisches von Schwefelkohlenstoff und Kohlendioxyd auf V_2O_5. Es scheint sich als Anhydrid einer Thiosäure zu verhalten.

Vanadinitrid VN kann durch Einwirkung von Stickstoff auf V_2O_3 in der Hitze oder aus den beiden Elementen bei Weißglut dargestellt werden. Entsteht auch bei der Reaktion von Stickstoff oder Ammoniak auf viele andere Vanadiumverbindungen. Graubraunes Pulver, das an der Luft beim Er-

hitzen V_2O_3 und mit Natronkalk Ammoniak bildet.

Dieser Wertigkeitsstufe entspricht ein Vanadikarbid von der Formel V_4C_3.

Vanadisulfat bildet Alaune und eine Vanadinsulfatschwefelsäure $V_2(SO_4)_3 . H_2SO_4 . 12H_2O$.

11. Verbindungen, in denen das Vanadium vierwertig erscheint (Vanadin(IV)-Verbindungen.) Das $V(OH)_4$ ist eine sehr schwache Base, so daß die Mehrzahl der Salze nicht durch Ersatz der vier Hydroxylgruppen entsteht, sondern nur zwei durch Säurereste vertreten werden; diese Salze leiten sich also von dem Vanadylion $VO^{\cdot\cdot}$ (oder seinem Polymerisationsprodukt Divanadyl $V_2O_2^{\cdot\cdot\cdot\cdot}$) ab. Selbst diejenigen Salze, bei denen das Vanadium an vier Säurereste gebunden ist, vermögen wohl kaum merkliche Mengen von $V^{\cdot\cdot\cdot\cdot}$-Ionen zu bilden. Außerdem existieren Verbindungen, welche das Vanadium im Anion enthalten ,die Hypovanadite, die dem Anhydrid VO_2 entsprechen. Die geringe Elektroaffinität des vierwertigen Vanadins zeigt sich auch in der großen Zahl von Komplexverbindungen, die sich von allen Salzen in mannigfacher Weise ableiten.

Vanadintetrafluorid VF_4 entsteht aus dem entsprechenden Chlorid und Flußsäure bei tiefer Temperatur. Braungelbes, hygroskopisches Pulver, das zu einer blauen Flüssigkeit zerfließt. Vanadyldifluorid VOF_2 wird durch Einwirkung von Flußsäure auf VO_2 oder $VOBr_2$ in prismatischen ge ben Kristallen gewonnen.

Vanadiumtetrachlorid VCl_4, darstellbar aus $VOCl_3$ durch glühende Kohle, aus Vanadin und Chlor, aus V_2O_5 und Chlor bei 600°, aus V_2O_5, Schwefel und Chlor bei gewöhnlicher Temperatur, aus VCl_3 bei 600°, bildet eine dunkelbraunrote Flüssigkeit vom Siedepunkt 158° und gibt mit Wasser Vanadyldichlorid $VOCl_2$. Letzteres bildet glänzende, grasgrüne, tafelförmige Kristalle, die von Wasser zersetzt werden. Es sind die Hydrate $VOCl_2 . 2^1/_2 H_2O$ und $VOCl_2 . 5H_2O$ bekannt.

Vanadyldibromid $VOBr_2$ entsteht durch Erhitzen von $VOBr_3$ und aus V_2O_5, Schwefel und Schwefelbromür. Gelbes ockerähnliches Pulver, das sich in Wasser mit blauer Farbe löst. Sublimiert bei 320°, wobei etwas Tribromid und VOBr entstehen.

Vanadiumdioxyd VO_2 (auch Tetroxyd V_2O_4 genannt) entsteht durch Reduktion von V_2O_5. Es zeigt je nach der Darstellung etwas verschiedene Eigenschaften; am häufigsten ist es als amorphe, schwarze bis dunkelgrüne Masse oder als dunkles, stahlfarbenes Kristallpulver beschrieben worden. In Säuren und Alkalien leicht löslich. Auch Hydroxyde sind in der Literatur erwähnt. Setzt man zu Vanadylsalzen überschüssige Lauge in der Hitze, so entstehen Lösungen, aus denen beim Erkalten die Salze der Vanadigen Säure auskristallisieren. Formeln derartiger Salze (Hypovanadite) sind: $Na_2V_4O_7 . 7H_2O$; $K_2V_4O_7 . 7H_2O$; $(NH_4)_2V_4O_7 . 7H_2O$; $BaV_4O_7 . 5H_2O$.

Aus sauren VO_2-Lösungen fällt durch Schwefelammonium hauptsächlich Vanadylsulfid VOS.

Vanadylsulfat $VOSO_4$ kommt in zwei Modifikationen, einer löslichen und einer unlöslichen, vor. Die unlösliche Form (graugrünes kristallinisches Pulver) entsteht durch Erhitzen des aus überschüssiger Schwefelsäure und VO_2 darstellbaren sauren Sulfats $2VOSO_4 . H_2SO_4$. Wird die unlösliche Modifikation mit wenig Wasser auf 130° erhitzt, so bildet sich die lösliche Form, die auch entsteht durch Einengen der gesättigten Lösung von VO_2 in Schwefelsäure bei gelinder Wärme oder durch Eindampfen zur Trockene der Lösung von $2VOSO_4 . 7H_2O$ (herstellbar durch Eindampfen der möglichst neutralen Lösung von $VOSO_4$ bei ca 80°). Blaue amorphe durchscheinende Masse. Verschiedene Hydrate des Sulfats und saure Salze sind bekannt.

Vanadinkarbid VC entspricht dieser Wertigkeitsstufe des Vanadins und entsteht auch im elektrischen Ofen durch Reduktion der Oxyde mit Kohle — analog wie de anderen, schon erwähnten Vanadinkarbide. —

Oxyde wie V_6O_4, V_4O_9, V_8O_{17} werden als Vanadylsalze der Vanadinsäure aufgefaßt: $V_2O_4 . 2V_2O_5$; $V_2O_4 . V_2O_5$; $3V_2O_4 . V_2O_5$.

12. Verbindungen, in denen das Vanadium fünfwertig erscheint (Vanadin(V)-Verbindungen). In diese Gruppe gehört die Mehrzahl der bekannten Vanadinverbindungen; die Verbindungen der anderen Wertigkeitsstufen gehen an der Luft, besonders in der Wärme, in diese Stufe über. Hier kommt auch der saure Charakter des Vanadiums voll zur Geltung, dem die Vanadinsäure und viele komplexe Säuren entsprechen. $V^{\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot}$-Ionen kommen kaum vor, obgleich das Salz VF_5 dargestellt werden konnte; besser bekannt dagegen sind Salze, welche sich von den Kationen $VO^{\cdot\cdot\cdot}$ und $VO_2^{\cdot}$ ableiten.

Vanadinpentafluorid VF_5 wird aus VF_4 gewonnen, indem bei 650° ein Stickstoffstrom durchgeleitet wird. Weiße Masse. Leicht löslich in Wasser und organischen Lösungsmitteln. Dichte bei 19° 2,1766. Siedepunkt 111,2°. Bildet leicht Oxyfluoride.

Vanadinoxyfluoride. Aus $VOCl_3$ und Flußsäure bei tiefer Temperatur oder aus

VF_3 und Sauerstoff entsteht Vanadinoxytrifluorid VOF_3 in harten, gelblich-weißen Kristallkrusten, die an der Luft zerfließlich sind. Bei der Behandlung von V_2O_5 mit konzentrierter Flußsäure entstehen farblose Lösungen, in denen wahrscheinlich das Pentafluorid oder das Oxyfluorid VOF_3 enthalten ist; durch Verdünnen werden die Lösungen gelb und hydrolytisch gespalten und zwar in VO_2F und V_2O_5. Von den Oxyfluoriden VOF_3 und VO_2F leiten sich zahlreiche Komplexe, die Fluoxyvanadate, ab, die z. B. nach dem Typus $VOF_3.MeF$, $2VOF_3.3MeF$, $VO_2F.3MeF$, $2VO_2F.3MeF$, $VO_2F.Me^{II}F_2$ (Me gleich einwertiges, Me^{II} gleich zweiwertiges Metall) gebaut sind und entstehen, wenn man zu den flußsauren Lösungen die entsprechenden Metallchloride oder -karbonate fügt.

Vanadiumoxytrichlorid $VOCl_3$ entsteht durch Einwirkung von Chlor auf V_2O_3 (besonders in Gegenwart von Kohle), aus V_2O_5 durch Chlor oder Chlorwasserstoff bei erhöhter Temperatur, aus V_2O_5, Schwefel und Chlor beinahe ohne Erwärmung und aus VCl_3 und Sauerstoff. Hellgelbe, leichtbewegliche Flüssigkeit, die durch Wasser in V_2O_5 und Chlorwasserstoff zersetzt wird. Siedepunkt 127°. Dichte 1,836.

Vanadinpentoxyd V_2O_5 wird aus dem bei der Verarbeitung der Vanadinerze zuerst gewonnenen und dann noch gereinigten Ammoniumvanadat durch Rösten an der Luft dargestellt. Auch beim Erhitzen anderer Vanadinverbindungen sowie durch Oxydation der niedrigeren Vanadinoxyde entsteht V_2O_5. Gelbes bis rotes Pulver; auch in Kristallen erhaltbar; Dichte bei 18° 3,357. Schmilzt bei ca. 660°. Verflüchtigt sich im elektrischen Ofen. Giftig. Löslich in starken Säuren und Alkalien; mit letzteren bilden sich Vanadate; V_2O_5 ist also ein Säureanhydrid. V_2O_5 löst sich auch etwas — je nach der Herstellungsart verschieden — in Wasser; wahrscheinlich handelt es sich um eine kolloidale Lösung. Kolloidales Pentoxyd entsteht auch beim Verreiben von Ammoniumvanadat mit Salzsäure.

Die Hydrate des Pentoxyds sind im reinen Zustande noch nicht hergestellt worden; die durch Ansäuern von Vanadatlösungen ausfallenden Niederschläge, die früher als Pyrovanadinsäure $H_4V_2O_7$ und Metavanadinsäure HVO_3 beschrieben worden sind, sind wahrscheinlich V_2O_5 mit je nach dem Trocknen wechselnden Wassermengen. In den durch Ansäuern von Vanadaten erhaltenen Lösungen befindet sich nach Untersuchungen über die Neutralisation und Leitfähigkeit auch die Hexavanadinsäure $H_4V_6O_{17}$, die aber nicht im festen Zustande herstellbar ist. Beim Ansäuern von Natriumorthovanadatlösung entstehen mit steigendem Salzsäurezusatz die folgenden Ionenarten VO_4''' — V_2O_7'''' — V_3O_9''' (= $3VO_3'$) — $V_6O_{17}H'''$, bis zuletzt V_2O_5 ausfällt. Vanadinsäure in schwefelsaurer Lösung wird durch Wasserstoffsuperoxyd oder Persulfat zu vierwertigen Vanadinverbindungen reduziert, während unter anderen Bedingungen Vanadate mit Wasserstoffsuperoxyd rote Lösungen von übervanadinsauren Salzen, entsprechend der Uebervanadinsäure HVO_4, liefern. Kolloidale Vanadinsäure erhält man in Lösung, wenn man geschmolzene Vanadinsäure mit kaltem Wasser abschreckt; aus der Lösung fällt durch Chlorammon braune amorphe Vanadinsäure, die in destilliertem Wasser wieder löslich ist. Der Abdampfrückstand ist nicht mehr wasserlöslich, aber sehr reaktionsfähig. Die Vanadate sind ungemein mannigfaltig zusammengesetzt. Die Alkali- und Erdalkalisalze sind kristallinisch, weiß, gelb oder rot. Die Natrium- und Kaliumsalze sind meist wasserlöslich. Nach dem Schmelzen geben gewisse Vanadate (die Salze der einwertigen Metalle der ersten Gruppe des periodischen Systems) unter Spratzen Sauerstoff ab. Man unterscheidet die Orthovanadate Me_3VO_4 (Me gleich einwertiges Metall), die Pyrovanadate $Me_4V_2O_7$, die Metavanadate $MeVO_3$, die Hexavanadate $Me_4V_6O_{17}$ und zahlreiche andere kompliziertere Typen. Sehr ausgeprägt ist die Neigung der Vanadate, Doppelsalze und Komplexsalze zu bilden.

Vanadinpentasulfid V_2S_5 entsteht durch Erhitzen des Trisulfides V_2S_3 mit Schwefel.

Literatur *s. bei „Tantal“.*

W. Herz.

γ) Niob.

Niob. Nb. Atomgewicht 93,5.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung. 5. Charakteristik. 6. Eigenschaften des Elementes. 7. Analytisches Verhalten. 8. Verbindungen, in denen das Niob einwertig erscheint. 9. Verbindungen, in denen das Niob zweiwertig erscheint. 10. Verbindungen, in denen das Niob dreiwertig erscheint. 11. Verbindungen, in denen das Niob vierwertig erscheint. 12. Verbindungen, in denen das Niob fünfwertig erscheint.

1. Atomgewicht. Die internationale Atomgewichtskommission gibt für 1912 das Atomgewicht des Niobs zu 93,5 an mit einer wahrscheinlichen Unsicherheit in der ersten Dezimalen. Dieser Wert ist in Uebereinstimmung

stimmung mit der Avogadroschen Regel (Dampfdichte von $NbCl_5$), der Dulong-Petitschen Regel, der Isomorphielehre und dem periodischen System der Elemente.

2. Vorkommen. Niob kommt fast immer in Begleitung seines höheren Homologen, des Tantals, vor. Die Mineralien sind weit verbreitet, finden sich aber meist nur in geringen Mengen. Die Niobmineralien sind Salze der Niobsäure. Die wichtigsten Erze sind Pyrochlor (Calciumniobat), Niobit (auch Columbit genannt; Eisenniobat), der Samarskit und die Niobtantalate Yttrotantalit und Fergusonit.

3. Geschichte. Das Niob wurde zum ersten Male 1801 von Hatchett unter dem Namen Columbium entdeckt, doch hielten Wollaston und Berzelius sein Oxyd für identisch mit dem des Tantals. Zum zweiten Male wurde die Niobsäure 1844 von H. Rose aufgefunden. Die richtige Formel der Niobsäure verdanken wir Marignac 1865. Die Reindarstellung des Metalles gelang erst Werner von Bolton 1905.

4. Darstellung. Die Niobmineralien lassen sich mit Kaliumbisulfat aufschließen, worauf die Schmelze mit Wasser ausgelaugt wird; ungelöst bleiben schwefelsäurehaltige Niob- und Tantalsäure. Bei Anwesenheit großer Titanmengen geht bei dieser Methode ein Teil dieser Säuren in Lösung, weshalb in diesem Falle besser mit Flußsäure oder KHF_2 behandelt wird und das Kaliumfluoniobat und -tantalat zur Kristallisation gebracht werden. Bei der Verarbeitung von Yttrotantalit wird das Mineral durch Glühen mit Kohle und Natriumkarbonat in Niob- und Tantalnitrid und -karbid übergeführt, die durch Salz- und Flußsäure zerlegt werden. Auch durch Schmelzen mit Natriumhydroxyd können die Mineralien aufgeschlossen werden. Aus Niobit und Tantalit, die immer zusammen vorkommen, erhält man mit Kohle im elektrischen Ofen ein Gemisch von Niob- und Tantalsäure, die getrennt werden können, da das Kaliumfluotantalat schwer und das Kaliumfluoniobat leicht löslich ist. — Niobmetall wird rein durch Erhitzen des Pentoxyds mit Paraffin und Kohlepulver auf 1700° und Glühen des entstandenen Tetroxyds im Vakuum durch elektrischen Wechselstrom erhalten oder aus der auf aluminothermischen Wege gewonnenen, Niobaluminiumlegierung durch vielstündiges Glühen im Flammenbogen eines elektrischen Vakuumofens.

5. Charakteristik. Das Niob ist im periodischen System das höhere Homologe des Vanadiums. In der fünfwertigen Stufe hat das Niob stärker basische und schwächer saure Eigenschaften als das Vanadium. Nb_2O_5 spielt die Rolle eines Säureanhydrids; die Lösungen der Alkaliniobate sind sehr stark hydrolytisch gespalten. Die Niobsäure ähnelt der Zinnsäure. Die in Lösung beständigsten und charakteristischsten Verbindungen sind die Fluo- und Fluoxyniobate. Die Elektroaffinität von Nb····· scheint stärker als die von V····· und schwächer als die des Ta····· zu sein: doch ist auch das letztere noch ein recht schwaches Ion. Die niedriger wertigen Verbindungen des Niobs sind unbeständiger als die des Vanadiums, so daß z. B. keine dem NbO entsprechenden Verbindungen bekannt sind.

6. Eigenschaften des Elementes. Da das reine Metall erst seit wenigen Jahren bekannt ist, sind die älteren Angaben unzuverlässig.

6a) Physikalische Eigenschaften. Niob ist ein mattgraues Metall, das sich durch Walzen ist ein glänzend poliertes, brüchig elastisches Metallband verwandeln läßt. Der geschmolzene Regulus ist krystallinisch (wahrscheinlich rhomboedrisch). Hart wie Vanadin; die unreinen Präparate scheinen noch härter wie das reine Metall zu sein. Dichte 12,7 (im unreinen Zustande nur 7,0 bis 7,5). Schmelzpunkt 1950°. Bei Rotglut schweißbar. Spez. Wärme 0,071. Gewalztes Blech (1m1qmm) hat die spez. elektrische Leitfähigkeit 0,187. Niob kann passiv werden. Ist paramagnetisch; die Suszeptibilität sinkt mit steigender Temperatur. Brechungsindex 1,80, Absorptionskoeffizient 2,11, Reflexionsvermögen 41,3 % gegen gelbes Licht. Niob besitzt vielleicht ganz schwache Radioaktivität.

6b) Chemische Eigenschaften. Bei gewöhnlicher Temperatur ist das Metall an der Luft haltbar; bei höherer oxydiert es sich teilweise. Glühendes Niob zersetzt Wasser unter heftiger Wasserstoffentwicklung. Wirkt auf viele Verbindungen (SO_2, P_2O_5, As_2O_5) reduzierend. Vereinigt sich direkt mit Wasserstoff, Stickstoff, Chlor und Schwefel. Reines Niob wird nur durch Flußsäure angegriffen, und zwar rasch nur bei Gegenwart von Platin. Unreines Niob löst sich auch in konzentrierter Schwefelsäure beim Erhitzen. In Alkalihydroxyd- oder nitratschmelze bildet das Niob Niobate. Legierungen sind mit Eisen und Aluminium (Verbindung $NbAl_3$) bekannt.

7. Analytisches Verhalten. Aus Alkaliniobatlösungen fällt durch Mineralsäuren ein weißer, amorpher Niederschlag von Niobsäure, der in Säureüberschuß nur wenig löslich ist. Konzentrierte Schwefelsäure löst Niobsäure beim Erhitzen auf und die Lösung trübt sich auch nicht beim Verdünnen mit kaltem Wasser (Unterschied vom Tantal), während beim Kochen der verdünnten Lösung sich Niobsäure abscheidet. Ammoniak und Schwefelammo-

nium fällen aus der Schwefelsauren Lösung Niobsäure. Zink gibt in einer sauren Niobsäurelösung eine blaue Färbung, die sich allmählich verändert. Ferrocyankalium liefert einen grüngelben Niederschlag. Die quantitative Bestimmung erfolgt durch Wägung als Nb_2O_5. (Vgl. auch „Tantalreaktionen“).

8. Verbindungen, in denen das Niob einwertig erscheint (Niob(I)-Verbindungen). In dieser Stufe ist wohl nur das Niobhydrid NbH zu erwähnen, welches sich durch Reduktion eines Gemisches von K_2NbF_7 und KHF_2 mit Natrium oder beim Glühen von Niob im Wasserstoffstrome darstellen läßt. Schwarzes bis schwarzgraues Pulver, das sich schon bei 100° oxydiert und an der Luft leicht zu Nb_2O_5 verbrennt.

9. Verbindungen, in denen das Niob zweiwertig erscheint (Niob(II)-Verbindungen). Die Verbindungen dieser Stufe sind nicht sicher erwiesen und jedenfalls recht unbeständig; lösliche zweiwertige Niobverbindungen sind nicht existenzfähig. Hierher gehört vornehmlich das Nioboxydul NbO, das durch Reduktion von Kaliumfluoxyniobat mit Natrium darstellbar ist. Daß es eine chemische Verbindung und kein Gemenge von Niob mit anderen niedrigen Nioboxyden ist, wird durch die Tatsache sehr wahrscheinlich, daß es durch Chlor oder Salzsäure in $NbOCl_3$ verwandelt wird. Schwarzes Pulver vom spezifischen Gewicht 6,3 bis 6,7, das die Elektrizität leitet; wurde früher für metallisches Niob gehalten.

10. Verbindungen, in denen das Niob dreiwertig erscheint (Niob(III)-Verbindungen).

Niobtrichloid $NbCl_3$ entsteht beim Leiten des Pentachloriddampfes durch eine glühende Röhre oder bei der Einwirkung von Oxychloriddampf auf erhitztes Magnesium. Schwarze, metallglänzende, jodähnliche Kristallmassen. Weder flüchtig noch zerfließlich; beständig gegen Wasser.

Nioboxyd Nb_2O_3 (die Formel ist nicht ganz sicher) entsteht durch Reduktion von Nb_2O_5 mit Magnesium als bläulichschwarze Masse.

Niobnitrid NbN (die Formel ist nicht ganz sicher) bildet sich bei der Einwirkung von Ammoniak auf Niobchlorid und weniger gut auf andere Niobverbindungen. Schwarzes, beim Erhitzen leicht oxydables Pulver, das die Elektrizität leitet. — Dreiwertige Niobverbindungen entstehen aus höherwertigen in Lösung durch Reduktion mit Zink, worauf die bei den Reaktionen angegebene Blaufärbung beruht. Besonders bei Gegenwart von etwas Flußsäure und Ansäuern mit konzentrierter Salzsäure wird Niobsäure vollständig reduziert, so daß darauf eine Titrationsmethode der Niobsäure begründet werden kann.

11. Verbindungen in denen das Niob vierwertig erscheint (Niob(IV)-Verbindungen).

Niobdioxyd NbO_2 (gewöhnlich Tetroxyd Nb_2O_4 genannt) wird durch Reduktion von Nb_2O_5 mit Wasserstoff bei Weißglut als schwarzes, bläulich schimmerndes Pulver erhalten.

Niobkarbid NbC ist durch Erhitzen von Niobsäure oder saurem Kaliumniobat mit Kohle und Natriumkarbonat auf 1500° zu erhalten. Bei niedriger Temperatur enthält das Reaktionsprodukt noch Stickstoff (vielleicht ein Gemenge von Karbid und Nitrid).

Niobsulfid, das aus Nb_2O_5 durch mit Schwefelwasserstoff beladenen Schwefelkohlenstoffdampf entsteht, hat wahrscheinlich die Formel NbS_2; das in der Literatur angegebene Oxysulfid existiert nicht.

12. Verbindungen, in denen das Niob fünfwertig ist (Niob (V)-Verbindungen).

Hierher gehören die meisten Niobverbindungen. Außer dem Jon $Nb^{\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot}$ ist auch noch $NbO^{\cdot\cdot\cdot}$ vorhanden. Die Salze dieser beiden Ionen werden hydrolytisch gespalten und liefern dabei Nb_2O_5 oder dessen Hydrate. Die diesen Jonen entsprechenden Verbindungen (besonders NbF_5 und $NbOF_3$) bilden die Neutralteile beständiger komplexerer Anionen. In diese Gruppe gehören auch die Niobsäure und ihre Salze.

Niobpentafluorid NbF_5 ist durch Einwirkung von Fluor auf erwärmtes Niob oder aus NCl_5 durch wasserfreie Flußsäure zu erhalten. Farblose Kristalle. Schmelzpunkt 75,5°. Siedepunkt 217 bis 220°; sehr hygroskopisch und klar in Wasser löslich. Beim Eintragen des Fluorids in Natronlauge entsteht Fluoxyniobat. Außerdem existieren zahlreiche Metallniobfluoride, Fluoniobate, welche sich bilden, wenn man Niobsäure oder Fluoxyniobatlösungen in viel Flußsäure löst und Metallkarbonate hinzusetzt. Die Fluoniobate sind kristallisiert und entsprechen hauptsächlich den Typen: $2\,MeF.NbF_5$ und $3\,NbF_5.5\,Me^{II}F_2.xH_2O$.

Nioboxyfluorid $NbOF_3$ entsteht durch Zersetzung von NbF_5 oder durch Einwirkung von Chlorwasserstoffgas auf die rotglühende Schmelze von Nb_2O_5 in CaF_5. Von diesem Oxyfluorid leiten sich zahlreiche komplexe Verbindungen ab, welche dargestellt werden, indem zu den Lösungen von Nb_2O_5 in wenig Flußsäure (bei viel Flußsäure entstehen die komplexen Fluoniobate) Metallfluoride zugesetzt werden.

Diese Fluoxyniobate sind die beständigsten Niobverbindungen, z. B. $K_2NbOF_5.H_2O$; $(NH_4)_2NbOF_5$; $ZnNbOF_5.2H_2O$; $3NbOF_3.5KF.H_2O$; NH_4NbOF_4; K_3NbOF_6.

Niobpentachlorid $NbCl_5$ wird dargestellt durch Einwirkung von Chlor auf Niob bei 200° oder auf das durch Glühen von Nb_2O_5 mit Kohle erhaltene Produkt, durch Erhitzen von Nb_2O_5 mit Chlorverbindungen (PCl_3, CCl_4) im zugeschmolzenen Rohre oder durch Behandlung von Nb_2O_5 mit Chlor und Schwefelchlorür. Gelbe — in ganz reinem Zustande weiße — Nadeln. Schmelzpunkt 194°. Siedepunkt 240,5°. In organischen Lösungsmitteln löslich; an der Luft zerfließlich; gibt mit Wasser Nb_2O_5 oder seine Hydrate.

Nioboxychlorid $NbOCl_3$ entsteht bei einem Teil der Chloriddarstellungsmethoden als Nebenprodukt. Weiße, seidenglänzende Masse, die bei ca. 400° sublimiert. Bildet auch komplexe Salze vom Typus $MeNbOCl_4$ und Me_2NbOCl_5.

Das Pentabromid, Oxybromid und Jodid sind analog.

Niobpentoxyd Nb_2O_5 entsteht bei der Verarbeitung der Niobmineralien durch Glühen der Niobsäure und auch sonst leicht bei der Oxydation verschiedener Niobverbindungen. Weißes, beim Erhitzen vorübergehend gelb werdendes Pulver. Dichte 4,4 bis 4,5. Die Hydrate des Pentoxyds sind die Niobsäuren. Sie entstehen bei der Hydrolyse des Niobchlorids, durch Zersetzung der Alkaliniobate mit Schwefel- oder besser Essigsäure sowie durch Auflösung einer Niobsäurekaliumbisulfatschmelze. Die mit Sulfat hergestellte Säure ist leicht etwas Sulfathaltig. Beschrieben sind die Hydrate $3Nb_2O_5.4H_2O$ und $3Nb_2O_5.7H_2O$. Die Hydrate sind in Wasser unlöslich, geben aber leicht kolloidale Lösungen. Die Niobsäure ist der Zinnsäure ähnlich. Frischgefällte Niobsäure ist in Natronlauge oder Natriumkarbonatlösung leicht löslich, die gealterte Säure dagegen schwer oder unlöslich. Kolloidale Niobsäure wird durch Schmelzen von Nb_2O_5 mit Alkali und Dialysieren hergestellt; die kolloidale Lösung ist nicht beständig und koaguliert durch Kohlendioxyd schlechter als die analoge Tantalsäure. Die Niobate werden gewöhnlich durch Zusammenschmelzen der Niobsäure mit den entsprechenden Oxyden, Hydroxyden, Karbonaten dargestellt. Sie enthalten Base und Säure in den mannigfachsten Verhältnissen; doch ist die Individualität der beschriebenen Salze ebensowenig wie ihre Konstitution oder ihr Molekelgewicht sicher gestellt. Nur ein Teil der Alkalisalze ist in Wasser löslich. Eine Reihe von Niobaten ist auf die Typen der Orthoniobsäure H_3NbO_4, der Pyroniobsäure $H_4Nb_2O_7$ und einer Hexaniobsäure $H_8Nb_6O_{19}$ zurückführbar. Mit anderen Säuren bildet Niobsäure Komplexe, z. B. die Nioboxalsäure. Durch Wasserstoffsuperoxyd entstehen die Ueberniobsäure $HNbO_4$ und ihre Salze.

Literatur *s. bei „Tantal".*

W. Herz.

δ) Tantal.

Tantal. Ta. Atomgewicht 181,5.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung. 5. Verwendung. 6. Charakteristik. 7. Eigenschaften des Elementes. 8. Legierungen. 9. Analytisches Verhalten. 10. Verbindungen, in denen das Tantal niedriger als fünfwertig erscheint. 11. Verbindungen, in denen das Tantal fünfwertig erscheint.

1. Atomgewicht. Die internationale Atomgewichtskommission gibt für 1912 das Atomgewicht des Tantals zu 181,5 mit einer wahrscheinlichen Unsicherheit in der ersten Dezimalen an. Dieser Wert ist in Uebereinstimmung mit der Avogadroschen Regel (Dampfdichte von $TaCl_5$), der Regel von Dulong und Petit, der Lehre vom Isomorphismus und dem periodischen System der Elemente.

2. Vorkommen. Die natürlich vorkommenden Tantalverbindungen sind Salze der Tantalsäure. Das Eisentantalat, der Tantalit, kommt stets mit Niobit zusammen vor, wie überhaupt Niob und Tantal fast immer gemeinsam auftreten (s. „Niob" unter 2).

3. Geschichte. Das Tantal wurde 1802 von Ekeberg in zwei nordischen Mineralien entdeckt. Lange Zeit wurden Niob und Tantal für identisch gehalten, bis Rose 1844 den Nachweis ihrer Verschiedenheit erbrachte. Die Reindarstellung des Metalles führte erst 1904 Werner von Bolton aus.

4. Darstellung. Ueber die Verarbeitung der Tantalerze vgl. das bei „Niobdarstellung" gesagte. Die Gewinnung des reinen Metalles erfolgt durch elektrolytische Reduktion des Tantaltetroxyds, durch Reduktion des Tantalpentoxyds mit nicht zu viel Kohle bei Weißglut im Wasserstoffstrome, oder durch Schmelzen des unreinen durch Reduktion von Kaliumfluotantalat mittels Kalium erhaltenen Tantalpulvers im elektrischen Lichtbogen eines Vakuumofens.

5. Verwendung. Wegen seines hohen Schmelzpunktes und seiner starken Lichtemission bei hoher Temperatur findet das Tantal als Glühfaden in elektrischen

Lampen Verwendung. Bei normalem Betriebe verbraucht die Lampe 1,5 Watt; die Temperatur des Glühfadens beträgt etwa 1750°. Tantal ist auch zur Herstellung säurebeständiger Gefäße empfohlen worden.

6. Charakteristik. Das Tantal ist das höhere Homologe des Niobs und verhält sich ihm sehr ähnlich. Die niedriger wertigen Verbindungen treten beim Tantal sehr zurück.

7. Eigenschaften des Elementes. a) Physikalische Eigenschaften. Platingraues duktiles Metall, das sich zu feinstem Blech auswalzen und Draht ziehen läßt. Dichte 16,6. Schmelzpunkt 2850°. Spezifische Wärme 0,0365. Spezifischer elektrischer Widerstand (1 m Länge, 1 qmm Querschnitt) 0,165; er wechselt nach der Vorbehandlung des Metalles und ist bei der Temperatur der Tantallampe etwa 6mal so groß wie bei Zimmertemperatur. Tantal ist paramagnetisch; die Suszeptibilität nimmt mit steigender Temperatur ab. Härte 6 bis 6,5. Brechungsindex 2,05, Absorptionskoeffizient 2,31, Reflexionsvermögen 43,8 % gegen gelbes Licht. Durch Verunreinigungen, wie sie das früher hergestellte unreine Metall immer enthielt, werden die physikalischen Eigenschaften sehr verändert. Tantal ist vielleicht ein wenig radioaktiv. b) Chemische Eigenschaften. Das Metall ist bei gewöhnlicher Temperatur luftbeständig, bei höherer Temperatur oxydiert es sich oberflächlich. Ganz dünner, in Luft oder Sauerstoff erhitzter Tantaldraht verglimmt mit weißer Flamme. Beim Erhitzen nimmt Tantal Wasserstoff auf, wobei das Metall kristallinisch und spröde wird. Die Reaktion zwischen Wasserstoff und Tantal ist reversibel. Die Art der Bindung des Wasserstoffs ist noch nicht bekannt; die Verhältnisse liegen hier ganz ähnlich wie bei der Aufnahme von Wasserstoff und Palladium. In der Glühhitze nimmt Tantal auch Stickstoff — wahrscheinlich unter Nitridbildung — auf. 0,5 % Kohle machen das Metall härter; bei 1 % Kohle wird es bereits spröde. Halogene greifen das Metall an, Fluor am meisten, Jod am wenigsten. Ganz reines Tantal löst sich nur in Flußsäure, unreines auch in kochender konzentrierter Schwefelsäure. Alkalilaugen sind ohne Wirkung; durch schmelzende Alkalien zerfällt das Tantal in kristallinische Klumpen. Wirkt im Glühzustande reduzierend. c) Kolloidales Tantal ist durch Zerstäubung im Hochspannungsbogen zu erhalten. Das Isobutylalkoholsol ist in durchfallendem Lichte braunschwarz, in reflektiertem schwarz.

8. Legierungen. Mit Eisen entsteht ein duktiler, harter Regulus von 6 bis 10% Tantal (Tantal wirkt wie Vanadium). Mit Molybdän und Wolfram gibt Tantal Legierungen in jedem Verhältnis. Unter den Aluminiumlegierungen existiert die Verbindung $TaAl_3$.

9. Analytisches Verhalten. Die Tantalreaktionen sind denen des Niobs ähnlich (s. d.). Die kleinsten Mengen Tantal neben Niob erkennt man beim Versetzen einer konzentrierten Lösung von Tantal- und Niobsäure in Flußsäure mit Fluorkalium: es entsteht das schwer lösliche K_2TaF_7, das beim Kochen in das noch schwerer lösliche Oxyfluorid $K_2Ta_4O_5F_{14}$ übergeht; die analogen Niobsalze sind leicht löslich.

10. Verbindungen, in denen das Tantal niedriger als fünfwertig erscheint. Durch Erhitzen von $TaCl_5$ mit Natriumamalgam im Glasrohr, Auflösen des Reaktionsproduktes in Salzsäure und Einengen der Lösung unter vermindertem Druck erhält man Tantalchlorür, dem die eigenartige Formel $(Ta_6Cl_{12}).Cl_2.7H_2O$ zukommt. Smaragdgrüne hexagonale Kristalle. Analog entsteht das Tantalbromür $(Ta_6Br_{12}).Br_2.7H_2O$. Durch Chlor- resp. Jodwasserstoff entstehen daraus die gemischten Haloide $(Ta_6Br_{12}).Cl_2.7H_2O$ und $(Ta_6Br_{12}).J_2.7H_2O$; mit Natronlauge fällt aus der Bromürlösung ein Hydroxyd $(Ta_6Br_{12}).(OH)_2\,10H_2O$. Tantaldioxyd TaO_2 (Ta_2O_4 Tetroxyd) wird durch starkes Glühen von Ta_2O_5 in Kohletiegeln oder durch Reduktion mit Magnesium gewonnen. Tiefgraue, ungeschmolzene Masse. Beim Erhitzen von Ta_2O_5 in mit Schwefelwasserstoff beladenem Schwefelkohlenstoffdampf am besten auf 900° entsteht Tantaldisulfid TaS_2. Grauschwarze, über 1200° kristallinisch werdende Masse. Durch Zusammenschmelzen von Ta_2O_5 mit Natriumkarbonat und Kohle auf 1500° bildet sich Tantalkarbid TaC; messinggelbe feine Nadeln; bei niedrigerer Temperatur hergestellt ist es etwas stickstoffhaltig und enthält vielleicht Tantalnitrid TaN. Dieses entsteht auch aus N_5Ta_3 (s. d.) durch Erhitzen auf Weißglut im trockenen Ammoniakstrom.

11. Verbindungen, in denen das Tantal fünfwertig erscheint (Tantal(V)-Verbindungen).

Tantalfluorid TaF_5 wird durch Einwirkung von Fluor auf Tantal oder aus dem Chlorid durch wasserfreie Flußsäure hergestellt. Farblose, stark lichtbrechende Kristalle. Schmelzpunkt 96,8°. Siedepunkt 229,5°. Dichte bei 15° 4,981. An der Luft zerfließlich; klar in Wasser löslich. Löst man Tantal oder Tantaloxyd in Flußsäure, so erhält man Lösungen von Tantalfluorid, aus denen beim Einengen verschiedene Verbindungen auskristallisieren, die wohl als Verbindungen von Tantalsäure und Flußsäure anzusehen sind. Durch Metall-

fluoride entstehen aus diesen Lösungen die Fluotantalate, deren wichtigste Typen $MeTaF_6$, Me_2TaF_7 und $Me^{II}TaF_7$ sind. Die Fluoxytantalate sind unbeständiger als die entsprechenden Niobverbindungen und werden aus Tantalsäure und Metallfluoriden hergestellt; der wichtigste Typus ist $3MeF.TaOF_3$.

Tantalpentachlorid $TaCl_5$ bildet sich bei der Einwirkung von Chlor (besser Chlor und Chlorkohlenstoff) auf Tantal oder Tantalsulfid, -nitrid, -carbid und aus Tantalpentoxyd durch Chlor und Schwefelchlorür. Gelbe, kristallinische Masse. Sublimiert schon von 144° an. Schmelzpunkt 211.3°. Siedepunkt 242°. Zersetzt sich mit Wasser. Aus der salzsauren Lösung werden durch organische Basen oder Metallchloride Komplexe gebildet, welche das Oxychlorid $TaOCl_3$ enthalten. Aehnlich sind das Tantalpentabromid $TaBr_5$ und das Tantalpentajodid TaJ_5.

Tantalpentoxyd Ta_2O_5 entsteht bei der Verarbeitung der Tantalmineralien durch Entwässern der Tantalsäuren, durch Oxydation verschiedener Tantalverbindungen, bei der Hydrolyse des Pentachlorids, durch Fällung der Fluotantalate mit Ammoniak und Glühen des erhaltenen Hydroxydes. Weißes, geruchloses, geschmackloses Pulver Dichte 8,7; langsam löslich in Flußsäure; löslich in geschmolzenem Kalium- oder Ammoniumbisulfat.

Tantalsäure. Durch Zersetzung von $TaCl_5$ mit Wasser, durch Behandeln der Schmelze von Pentoxyd und Kaliumbisulfat mit Wasser oder durch Einwirkung von schwefliger Säure auf Natriumtantalatlösung entsteht Tantalhydroxyd, dessen Wassergehalt nach dem Grade der Trocknung schwankt. Beschrieben wurden $2Ta_2O_5.3H_2O$; $Ta_2O_5.2H_2O$; $3Ta_2O_5.5H_2O$; doch ist ihre Individualität keineswegs sicher gestellt. Das aus der Bisulfatschmelze gewonnene Hydroxyd ist sulfathaltig, was entweder auf adsorptiver Verunreinigung oder auf der Bildung einer komplexen Tantalschwefelsäure beruht, wie solche komplexen Säuren bei der Tantalsäure (z. B. eine Tantaloxalsäure) wohl bekannt sind. Die Tantalsäuren sind sehr schwach. Ganz reine Tantalsäure ist blendend weiß. Die aus K_2TaF_7 durch Natronlauge frisch gefällte Tantalsäure löst sich in Natronlauge oder Natriumkarbonatlösung auf; die gealterte Säure ist dagegen darin unlöslich. Kolloidale Tantalsäure ist analog der kolloidalen Niobsäure (s. d.). Durch Zusammenschmelzen der Säure mit Alkalihydroxyden oder Alkalikarbonaten entstehen die Tantalate, von denen nur die Alkalisalze der Hexatantalsäure $4Me_2O.3Ta_2O_5$ löslich sind; die Lösungen sind stark hydrolysiert. Durch Säuren wird Tantalsäure abgeschieden, doch vermögen manche Säuren die Tantalsäure infolge Komplexbildung in Lösung zu halten. Die Salze der Tantalsäure mit Schwermetallen oder Erdalkalien werden durch Umsetzung der löslichen Alkalitantalate mit den entsprechenden Metallsalzen hergestellt. Die Tantalate sind hauptsächlich nach den Typen gebaut: $4Me^{II}O.Ta_2O_5$; $2Me^{II}O.Ta_2O_5$; $4Me^{I}_2O.3Ta_2O_5$; $Me^{I}_2O.Ta_2O_5$; $2Me^{I}_2O.3Ta_2O_5$; $Me^{I}_2O.3Ta_2O_5$. Inwieweit die diesen Kombinationen entsprechenden Salze wirkliche chemische Individuen und nicht Gemenge sind bleibt späteren Untersuchungen vorbehalten. Durch Wasserstoffsuperoxyd entstehen Uebertantalsäure $HTaO_4$ und ihre Salze.

Tantalnitrid Ta_3N_5 wird durch Einwirkung von Ammoniakgas auf $TaCl_5$ bei gelinder Erwärmung und darauf folgende Erhitzung in trockenem Ammoniak auf Rotglut dargestellt. Rotes amorphes Pulver.

Tantalsilicid ist aus Ta_2O_5, Aluminiumgries und Schwefelblumen zu erhalten. Eisengraue, metallglänzende Kristalle vom spezifischen Gewicht 8,83 und der Zusammensetzung $TaSi_2$, worin die Wertigkeit des Tantals unbekannt ist. Weiches Tantalmetall kann durch Silicium gehärtet werden.

Literatur: *Abegg, Handbuch der anorganischen Chemie III, 3.*

W. Herz.

Stickstoffverwertung.

1. Uebersicht. 2. Oxydation des Luftstickstoffs. 3. Kalkstickstoff. 4. Synthese von Ammoniak.

1. Uebersicht. Unter den mannigfachen chemischen Verbindungen des Stickstoffes sind die Salpetersäure und das Ammoniak von der größten praktischen Bedeutung und zwar in erster Linie als Düngemittel, um den Pflanzen den zu ihrem Wachstum nötigen Stickstoff in verdaulicher Form darzubieten. Die natürlichen Quellen dieser Stickstoffverbindungen sind die ungeheuren Lager von Natriumnitrat, welche sich in der regenlosen Wüste des nördlichen Chile finden (Chilisalpeter), und die Kohle, welche beim Glühen unter Luftabschluß einen großen Teil ihres Stickstoffgehaltes (1 bis 2%) als Ammoniak abgibt.[1] Auf Grund der Erkenntnis, daß

[1] Die Nitratlager in Chile nehmen einen Raum von etwa 25000 qkm ein und erstrecken

diese Quellen in absehbarer Zeit spärlicher fließen werden, hat man im letzten Jahrzehnt das alte Problem, den **Stickstoff der Luft** nutzbar zu machen, mit großer Energie angegriffen und im großen und ganzen glücklich gelöst. Folgende Wege hat man dabei mit Erfolg eingeschlagen:

1. Oxydation des Luftstickstoffes im elektrischen Lichtbogen
   a) Verfahren von Birkeland und Eyde,
   b) Verfahren von Schönherr,
   c) Verfahren von Pauling;
2. Bindung des Stickstoffes an Karbid als „Kalkstickstoff" (Verfahren von Frank) und an Aluminium (Verfahren von Serpela);
3. Synthese von Ammoniak aus Stickstoff und Wasserstoff (Verfahren von Haber).

Schließlich ist auch die biologische Verarbeitung des Luftstickstoffes durch Bakterien eingehender erforscht worden.

2. Oxydation des Luftstickstoffes im elektrischen Lichtbogen. 2a) Verfahren von Birkeland und Eyde. Daß sich unter dem Einfluß elektrischer Entladungen Stickstoff und Sauerstoff zu Stickoxyd verbinden, war schon vor mehr als 100 Jahren Cavendish bekannt. Die technische Verwertung wurde zuerst Ende des 19. Jahrhunderts von Bradley und Lovejoy am Niagarafall versucht. Sie ließen zwischen einer Trommel und einem in ihr rotierenden Zylinder, der mit Platinspitzen besetzt war, zahlreiche dünne Lichtbögen entstehen, die bei weiterer Drehung wieder abrissen, und leiteten durch den ringförmigen Zwischenraum einen Luftstrom, der beim Austritt eine gewisse Menge nitroser Gase enthielt. Trotzdem die Ausbeute befriedigte, war die Apparatur doch zu verwickelt und zu oft der Ausbesserung bedürftig.

Wirklichen Erfolg hatten erst die Norweger Birkeland und Eyde. Sie schickten die Luft durch einen mächtigen Wechselstromlichtbogen, welcher zwischen den Polen eines Elektromagneten zu einer flachen Scheibe von mehreren Metern Durchmesser zerblasen wird. Figur 1 zeigt einen senkrechten Schnitt durch diesen Ofen. A ist die Ofenwand, B der Elektromagnet, C eine der kupfernen, von innen mit Wasser gekühlten Elektroden, zwischen denen der Bogen übergeht. Die durch J und J' eintretende Luft wird zunächst in einer den Ofen umlaufenden Röhrenleitung vorgewärmt, tritt dann aus K und K' in die äußeren Kammern F und G und aus diesen durch die Lochreihen D und E in den von der Flamme erfüllten Mittelraum, den sie mit Stickoxyd beladen durch H und L

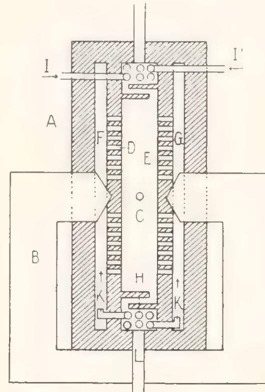


Fig. 1. Schema des Ofens von Birkeland und Eyde.

wieder verläßt (die Luft kann auch quer durch die Flamme geleitet werden, indem man sie bei F einführt und bei G austreten läßt). Von außen gesehen hat der Ofen die Form einer flachen hochkant gestellten Dose, welche von den Armen des Magneten umfaßt wird. Durch einen 500 Kilowatt-Ofen werden in der Minute 75 cbm Luft geschickt, welche mit einem Gehalt von etwa 1% Stickoxyd austreten. Später hat man in Notodden (im südlichen Norwegen), wo 60000 PS von benachbarten Wasserfällen für die Stickstoffoxydation geliefert werden, Oefen von 1000 bis 3000 KW in Betrieb genommen. Das Ofenfutter muß nach 4 bis 6 Monaten, die Elektroden müssen nach 3 bis 4 Wochen erneuert werden.

Aus dem Ofen gelangt die mit Stickoxyd beladene etwa 1000° heiße Luft zu Dampfkesseln, an welche sie einen Teil ihrer Wärme abgibt, und dann in das Kühlhaus, in welchem sie eine große Zahl von wassergekühlten Aluminiumröhren durchstreicht. In den daranschließenden Oxydationskammern, großen, mit säurefestem Stein ausgekleideten Eisenzylindern, oxydiert sich das abgekühlte Stickoxyd mit überschüssigem Luft-

sich über eine Länge von 700 km. 1905 wurden $1^1/_2$ Mill. t Chilisalpeter ausgeführt, 1909 schon 2 Mill., davon $^1/_2$ Mill. nach Deutschland. Nach dem Befunde der Chilenischen Regierung sollen noch 240 Mill. t vorhanden sein. Die Welterzeugung an Ammoniumsulfat (aus den Gasanstalten, Kokereien usw.) beträgt zurzeit rund 800000 t.

sauerstoff zu Stickstoffdioxyd.[1]) Aus den Oxydationskammern gelangen die nitrosen Gase in Absorptionstürme, die mit Quarzbrocken gefüllt sind, über welche Wasser herabrieselt. Hier entsteht verdünnte Salpetersäure, welche so lange im Gegenstrom durch die Türme kreist, bis sie etwa 30 Volumenprozent stark geworden ist. Zum Schluß werden die Reste von Stickoxyden in hölzernen Absorptionstürmen durch Kalkmilch zurückgehalten; nur 3 bis 4% entweichen ungenützt.

Die verdünnte Salpetersäure sammelt man in Behältern aus Granit und führt sie von dort in Wannen (ebenfalls aus Granit) über, welche mit Kalkstein beschickt sind. Die so gewonnene Lösung von salpetersaurem Kalk wird eingedampft, bis sie 13% Stickstoff enthält; dann leitet man die heiße Lösung über einen von innen gekühlten, sich drehenden Zylinder, wo sie erstarrt und in großen Stücken abspringt, die sich leicht mahlen lassen. Das grob gepulverte Calciumnitrat wird durch einen Elevator auf einen Speicher gehoben und aus ihm zum Versand in Fässer von 100 kg Inhalt gefüllt.

Ein anderer Teil der nitrosen Gase wird in eiserne Absorptionstürme geleitet, die mit Sodalösung berieselt werden. Die erhaltene Lösung von Natriumnitrit wird eingedampft; die ausgeschiedenen Kristalle werden in einer Zentrifuge getrocknet und dann in Fässer gepackt, die mit Papier ausgekleidet sind. Neuerdings haben die Stickstoffwerke in Notodden auch die Fabrikation von Ammoniumnitrat aufgenommen.

2b) Ofen von Schönherr. In dem Ofen von Schönherr (Badische Anilin- und Sodafabrik) wird die Luft spiralig um einen langen Lichtbogen herumgeleitet. Figur 2 zeigt einen schematischen Längsschnitt durch den röhrenförmigen Ofen, in dessen Achse der Lichtbogen brennt. Die eine Elektrode ist isoliert am Boden des Ofens eingeführt, der andere Pol der Stromquelle ist mit der eisernen Ofenwand verbunden. Die Luft wird zunächst zur Vorwärmung um den Ofen herumgeführt, tritt dann unten durch tangentiale, symmetrisch rings verteilte Stutzen ein, windet sich in Wirbeln um den ruhig brennenden Bogen empor und beläd sich dabei mit etwa 2% Stickoxyd. Sie tritt schließlich wieder unten aus, nachdem sie einen Teil ihrer Hitze an die einströmende Luft abgegeben hat. Um beim Einschalten des Ofens den Lichtbogen zu erzeugen, dient eine Hilfselektrode, in Figur 2 ein mit der Rohrwand leitend verbundener Eisenstab Z, der durch einen aus dem Ofen herausragenden Hebel mit der Elektrode E in Berührung gebracht und dann zurückgezogen wird. Der entstehende Lichtbogen klettert an der Innenwand bis in den oberen, von Kühlwasser K umgebenen Teil des Rohres empor; nun kann er wochenlang ruhig brennen.[2])

[1]) Bei Rotglut zerfällt Stickstoffdioxyd in Stickoxyd und Sauerstoff; deshalb muß man die Gase vor den Oxydationskammern abkühlen.

[2]) In Figur 2 ist ferner S ein Schieber, um die Oeffnungen für die eintretende Luft nach Bedarf zu verstellen; G_1, G_2 und G_3 sind Schaulöcher.

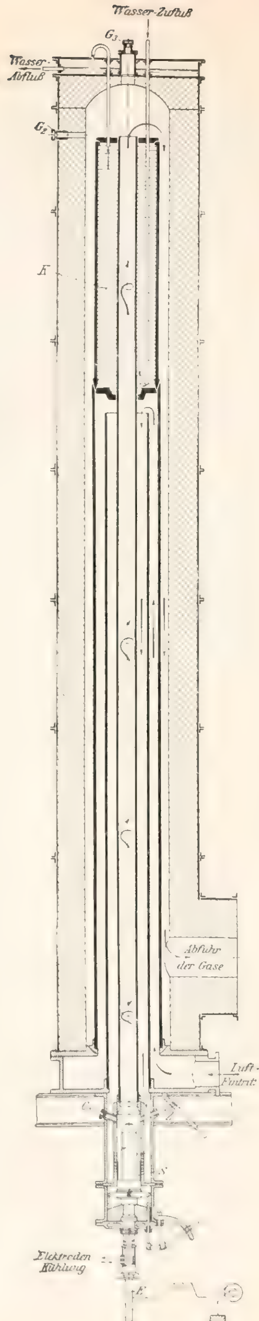


Fig. 2. Schema des Stickstoffofens von Schönherr.

Nach diesem von Schönherr und Heßberger ausgebildeten Verfahren arbeiten in den Stickstoffwerken am Rjukan[1]) (südliches Norwegen) Oefen bis zu 1000 KW; der Lichtbogen ist je nach der Größe des Ofens 5 bis 7 m lang.

Beide Ofenarten a und b werden von den Nordischen Stickstoffwerken nebeneinander betrieben. Die Ausbeute an Stickoxyd, bezogen auf die verbrauchte elektrische Energie ist bei beiden Ofenarten ungefähr gleich, 570 bis 600 kg HNO_3 für das KW-Jahr. Der Ofen von Schönherr ist einfacher und billiger, aber erfordert mehr Aufmerksamkeit.

2c) Ofen von Pauling. Der von den Brüdern H. und G. Pauling erfundene Ofen beruht auf dem Grundgedanken des Hörnerblitzableiters. Ein zwischen den unten nahe zusammentretenden Enden zweier auseinandergebogener Stäbe entstehender Lichtbogen wird durch die von ihm erzeugte heiße Luft emporgetragen und dabei immer länger ausgezogen, bis er schließlich zerreißt. Unterdes hat sich unten schon ein neuer Lichtbogen gebildet, der das gleiche Schicksal erleidet. Die einzelnen Bögen folgen so rasch aufeinander, daß sie (gerade wie bei Birkeland und Eyde eine Scheibe) eine zwischen den Hörnern lodernde Flamme von 1 bis 1½ m Höhe bilden. Zum Zünden des Bogens dienen „Zündschneiden“, messerartig schmale Hilfselektroden, welche durch Spalte in den Hörnern hindurchtreten und sich bis auf 2 bis 3 mm nähern. Durch eine darunter befindliche Düse wird die vorgewärmte Luft eingeblasen. Die Hörner sind aus Eisen und werden von Kühlwasser durchströmt; sie halten 500 bis 600 Stunden aus, während die kupfernen Schneiden schon nach 20 Stunden erneuert werden müssen. Das Auswechseln der Schneiden kann aber in 2 Minuten geschehen. Figur 3 zeigt einen Schnitt durch den Ofen. In jedem Ofen brennen zwei hintereinander geschaltete Bögen. Die erste Anlage dieser Art wurde 1904 in Patsch bei Innsbruck von der Salpetersäure-Industrie-Gesellschaft (Gelsenkirchen) errichtet, eine zweite 1908 von einer französischen Gesellschaft „Le Nitrogène“ in La Roche de Rame bei Briançon, wo jetzt 9 Oefen, jeder mit 400 KW arbeiten.[2]) Die nitrosen Gase gelangen aus dem Ofen mit 1,1 bis 1,2% Stickoxyd in Kühlkammern, die paarweise vorhanden sind und wechselnd nach 6 Stunden eingeschaltet werden. Die Oxydationskammer ist ein runder Turm aus armiertem Beton, 10 m im Durchmesser, 20 m hoch; aus ihm werden die Gase durch Tonröhren

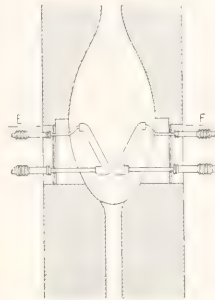


Fig. 3. Stickstoffofen von Pauling.

durch 5 Absorptionstürme geleitet, wo ihnen Wasser entgegengeführt wird; dahinter sind mit Sodalösung gespeiste Türme geschaltet. Aus dem ersten Absorptionsturm wird 35- bis 40prozentige Salpetersäure erhalten, die in Porzellanwannen auf 60 bis 62% eingedampft und als solche in den Handel gebracht wird. Die Stromausbeute ist etwa ebenso groß wie bei den beiden anderen Systemen.

Unter den anderen Ofenformen und vielen sonstigen Verbesserungsvorschlägen will ich hier nur den Ofen von Moscicki (Aluminium-Industrie-Gesellschaft Neuhausen) erwähnen, bei dem die eine Elektrode ein Stab, die andere ein konzentrischer Zylinder ist, in deren ringförmigem Zwischenraum der Bogen umläuft, und den Vorschlag von Schlösing erwähnen, welcher die nitrosen Gase geradenwegs von Kalkbriketts absorbieren läßt und so ohne weiteres ein als Düngemittel brauchbares Produkt mit 15% Stickstoff erhält.

Theorie der Stickstoffoxydation. Nach den Untersuchungen von Nernst und v. Wartenberg ist die Bildung von Stickoxyd im Lichtbogen ein thermischer Vorgang. Je höher die Temperatur, um so mehr Stickoxyd ist neben unverbundenem Stickstoff und Sauerstoff beständig. Im Gleichgewichtszustande enthält Luft bei 1200° noch nicht $^1/_{10}$%, bei 2000° über 1% und bei 3000° über 4% Stickoxyd. Beim langsamen Abkühlen hocherhitzter Luft zerfällt das Stickoxyd wieder; aber bei sehr raschem Erkalten gelangt das Gas bald in das Gebiet, in welchem die Zerfallsgeschwindigkeit klein wird, und das einer

[1]) Die Fälle des Rjukan sollen künftig 250000 PS liefern.

[2]) Eine dritte Anlage nach dem Paulingschen Verfahren wurde kürzlich in den Vereinigten Staaten erbaut.

höheren Temperatur entsprechende Gleichgewicht „friert ein".[1]) Man soll demnach die aus dem Lichtbogen tretende Luft möglichst schnell abkühlen; schon bei 1000° zerfällt das Stickoxyd verhältnismäßig langsam.

Nach den eingehenden Untersuchungen, die Haber und seine Mitarbeiter mit kleinen, verhältnismäßig kalten Bögen im luftverdünnten Raume anstellten, ist die Stickoxydbildung im Lichtbogen nicht ohne weiteres eine Wärmewirkung, sondern ein elektrischer Vorgang, durch den sich bei verhältnismäßig niedriger Temperatur viel höhere Stickoxydgehalte erzielen lassen als dem thermischen Gleichgewicht entsprechen. Aber in den Oefen der Technik mit ihren ausgedehnten Lichtbögen stellt sich sekundär das thermische Gleichgewicht ein.

3. **Kalkstickstoff** nach dem Verfahren von Frank und Caro. Leitet man einen Stickstoffstrom über glühendes, fein gemahlenes Calciumcarbid, so nimmt dieses unter Wärmeentwickelung den Stickstoff auf. Es bildet sich Calciumcyanamid, das unter dem Namen „Kalkstickstoff" als Düngemittel in den Handel gebracht wird. Durch Zugabe gewisser Salze, z. B. von Calciumchlorid (Patent von Polzenius), wird die Stickstoffaufnahme schon bei verhältnismäßig niederer Temperatur begünstigt. Ueberhitzen mindert den Stickstoffgehalt des Produktes, deshalb heizt man zweckmäßig die Masse durch einen zentrisch im Ofen liegenden Kohlenstab, der als Widerstand durch einen elektrischen Strom zum Glühen erhitzt wird, und stellt, sobald die Reaktion selber genügend Wärme liefert, den Strom ab. Der zur Herstellung nötige reine Stickstoff wird aus Luft entweder durch Fraktionierung flüssiger Luft oder durch Ueberleiten über glühendes Kupfer gewonnen.[2]) Das fertige Produkt soll 20% Stickstoff enthalten. Um das lästige Verstäuben beim Ausstreuen dieses Düngers zu hindern, feuchtet man die Masse schwach an und versetzt sie mit Petroleum.

Die erste große Fabrik für Kalkstickstoff wurde in Piano d'Orte bei Pescara (Oberitalien) erbaut, wo 25000 PS verfügbar sind. In Norwegen verarbeitet das riesige Carbidwerk Odda einen großen Teil seines Carbids auf Kalkstickstoff.

Statt den Kalkstickstoff selbst in den Handel zu bringen, kann man ihn auch in andere wertvolle Stickstoffverbindungen verwandeln, z. B. in Cyanid, indem man ihn mit Kochsalz schmilzt, oder in Ammoniak, indem man ihn mit überhitztem Wasserdampf behandelt.[1])

4. **Synthese von Ammoniak** nach Haber. Ammoniak ist bei niederer Temperatur beständig, zerfällt aber schon bei Rotglut fast vollständig in seine Bestandteile Stickstoff und Wasserstoff. Nach den Messungen von Haber sind in einem Gemische von 1 Raumteil Stickstoff mit 3 Teilen Wasserstoff bei 500° unter Atmosphärendruck nach erreichtem Gleichgewichte 0,5% Ammoniak vorhanden. Druckerhöhung verschiebt das Gleichgewicht zugunsten des Ammoniaks. Will man also Ammoniak synthetisch darstellen, so darf die Temperatur nicht zu hoch sein; sonst ist der Bruchteil des Gasgemisches, der sich zu Ammoniak vereinigt, gar zu gering. Andererseits ist die Geschwindigkeit, mit der sich Ammoniak bildet, um so kleiner, je niedriger die Temperatur ist. Diese zweite Schwierigkeit kann man überwinden, wenn man einen passenden „Katalysator" findet, welcher schon unterhalb Rotglut die Bildung genügend beschleunigt.

Nach langwierigem Suchen fand Haber im metallischen Uran einen geeigneten Reaktionsbeschleuniger und zwar ist das kohlenstoffhaltige Uran, das aus Uranoxyd und Kohle durch Erhitzen im elektrischen Lichtbogen erhalten wird und beim Gebrauch in ein feines stickstoffhaltiges Pulver zerfällt, schon unterhalb 500° ein ausgezeichneter Katalysator. Einen zweiten Kunstgriff, um die Ammoniakausbeute zu verbessern, wandte Haber an, indem er die Synthese unter sehr hohem Drucke sich vollziehen ließ; denn unter 100 Atm. Druck bilden sich in dem Gemische von 1 Teil Stickstoff und 3 Teilen Wasserstoff bei 500° schon über 10% Ammoniak. Ein dritter Kunstgriff besteht darin, daß er das entstandene Ammoniak durch Verflüssigen oder durch Absorption aus dem Gasgemisch entfernt; aus dem verbleibenden

[1]) Deshalb entsteht auch ohne Elektrizität Stickoxyd, wenn Luft genügend hoch erhitzt und rasch abgekühlt wird. So hat z. B. Hausser die bei Explosionen entstehende hohe Temperatur zur Erzeugung von Stickoxyd benutzt. Nach diesem Prinzip wird gegenwärtig eine Anlage zur Gewinnung von Luftsalpetersäure auf der Zeche de Wendel bei Hamm errichtet, in welcher Koksofengase mit Luft explosionsartig verbrannt werden.

[2]) Oder auch aus Verbrennungsgasen, indem man sie über eine glühende Mischung von Kupfer und Kupferoxyd leitet und aus dem entstandenen Gemenge von Stickstoff und Kohlensäure durch Absorption die Kohlensäure entfernt.

[1]) Auch andere Karbide binden Stickstoff z. B. wird nach den Patenten von Serpek Aluminiumkarbid durch Glühen im Stickstoffstrome in Aluminiumnitrid verwandelt, welches seinerseits mit Wasserdampf Ammoniak liefert.

Stickstoff und Wasserstoff bildet sich dann von neuem die dem Gleichgewicht entsprechende Ammoniakmenge und so kann, wenn man von Zeit zu Zeit Stickstoff und Wasserstoff ergänzt, eine beliebig große Menge Ammoniak synthetisch gewonnen werden.

Nachdem Haber derart das Problem im Laboratorium gelöst hatte, ging die Badische Anilin- und Sodafabrik daran, das Verfahren für den Großbetrieb auszuarbeiten. Auch hierbei waren zahlreiche Schwierigkeiten zu überwinden. Bei der dicht unter Rotglut liegenden Reaktionstemperatur wurden die als Gefäßmaterial in Betracht kommenden Metalle, im besonderen Eisen, durch die stark zusammengepreßten Gase angegriffen; kohlenstoffhaltiges Eisen z. B. gibt seinen Kohlenstoff an den heißen Wasserstoff ab und ist dann weder genügend druckfest noch gasdicht. Es gelang jedoch, dieser Materialschwierigkeiten Herr zu werden und auch die Gefahr, daß die Gefäße explodieren oder bei auftretender Undichtigkeit Wasserstoffflammen hervorbrechen, dadurch zu vermeiden, daß die Apparatur in eine druckfeste Kammer eingeschlossen wird. Eine dritte Gefahr wurde in einem Sauerstoffgehalt der reagierenden Gase erkannt; schon bei Gegenwart von wenig Sauerstoff kann eine Explosion eintreten. Deshalb wird jede Spur Luft möglichst ferngehalten und eine selbsttätige Vorrichtung warnt, sobald der Sauerstoffgehalt des Gases die zulässige Grenze überschreitet.

Bei diesen Versuchen wurden auch andere für die Ammoniaksynthese brauchbare Katalysatoren aufgefunden, z. B. feinverteiltes chemisch reines Eisen, das aber schon durch eine Spur Schwefel im Gase unbrauchbar gemacht wird. Es ist deshalb nötig, den Stickstoff und den Wasserstoff vorher auf das peinlichste zu reinigen.

Nach Abschluß der Vorarbeiten wird jetzt eine Fabrik für synthetisches Ammoniak in Oppau bei Ludwigshafen erbaut.

Literatur. ***E. Donath und K. Frenzel,*** *Die technische Ausnutzung des atmosphärischen Stickstoffs. Leipzig und Wien 1907.* — ***A. Bernthsen,*** *Ueber Luftsalpetersäure. Zeitschrift für angewandte Chemie* **22,** *1909, S. 1167 bis 1178.* — ***Eyde,*** *Vortrag auf dem 8. internationalen Kongreß für angewandte Chemie. New York 1912.* — ***Schönherr,*** *Ueber die Fabrikation des Luftsalpeters nach dem Verfahren der Badischen Anilin- und Sodafabrik. Elektrotechnische Zeitschrift 1909, Heft 16 und 17.* — ***Fr. Russ,*** *Die Fabrikation von Luftsalpetersäure in Oesterreich nach dem Verfahren der Salpetersäure-Industrie-Gesellschaft. Zeitschr. f. Elektrochemie* **15,** *1909, S. 544 bis 548.* — ***Zenneck,*** *Vortrag auf der Naturforscherversammlung zu Königsberg 1910, abgedruckt in der Physikalischen Zeitschrift vom 15. 10. 1910.* — ***F. Haber,*** *Gewinnung von Salpetersäure aus Luft. Zeitschrift für angewandte Chemie* **23,** *1910, S. 684 bis 689.* — ***Dobberstein,*** *Luftsalpetersäure aus Koksofengasen. Vortrag auf dem allgemeinen Bergmannstag. Wien 1912.* — *Ferner zahlreiche Abhandlungen und Auszüge in der Zeitschrift für Elektrochemie und in der amerikanischen Zeitschrift Metallurgical and Chemical Engineering (z. B. Bd. 9, 1911, S. 99 bis 104).* — ***N. Caro,*** *Industrien des Kalkstickstoffs und verwandter Verfahren. Vortrag auf dem 7. internationalen Kongreß für angewandte Chemie, London 1909; abgedruckt Zeitschr. f. angewandte Chemie* **22,** *1909, S. 1178 bis 1182.* — ***A. Bernthsen,*** *Vortrag über synthetisches Ammoniak auf dem 8. internationalen Kongreß für angewandte Chemie. New York 1912.*

K. Arndt.

Stimme und Sprache.

I. Die Stimme. 1. Die Zungenpfeifen und ihre Klänge. 2. Der menschliche Kehlkopf: a) Anatomie: α) Das Gehäuse des Kehlkopfes; β) Die äußeren Muskeln und Bänder des Kehlkopfes; γ) Die Stimmbänder und die inneren Muskeln des Kehlkopfes. b) Physiologie: α) Die indirekte Beobachtung des lebenden Kehlkopfes; β) Die direkte Beobachtung des Kehlkopfes; γ) Die koordinierten Bewegungen der Kehlkopfmuskeln. 3. Die windgebenden Apparate und das Windrohr. 4. Das Ansatzrohr. 5. Die Stimmbildung. 6. Die Eigenschaften der menschlichen Stimme: a) Der verschiedene Klang der menschlichen Stimme. Die Stimmregister; b) Die Höhe der menschlichen Stimme; c) Weitere Eigentümlichkeiten der Stimme. 7. Die Stimme der Tiere. II. Die Sprache. 1. Die Vokale: a) Die Bildung der Vokale; b) Die akustischen Eigenschaften der Vokale (Theorie der Vokale); c) Die Analyse der Vokale; d) Die Synthese der Vokale. 2. Die Konsonanten: a) Die Nasale M, N und N; b) Die L-Laute; c) Die Zitterlaute; d) Die Reibelaute. Zischlaute; e) Die Verschluß- oder Explosionslaute; f) Die graphische Darstellung der Konsonanten. 3. Die Vereinigung der Laute zur Sprache.

Wunderbar und vielgestaltig ist die Verwendung der verschiedenen Muskeln in unserem Körper; nicht bloß, daß sie ihn als Ganzes oder seine Teile gegeneinander bewegen und dadurch den Einzelnen vielfach im Verein mit anderen Stammesgenossen instand setzen, sich gegenüber der ihn umgebenden feindlichen Welt zu erhalten und zu verteidigen. Sie erzeugen noch ein viel wunderbareres Band, welches sozusagen die ganze Menschheit, die vergangene und die jetzt lebende umschlingt, das Band der Sprache. Denn die Sprache an sich ist in erster Linie weiter nichts als eine Summe von Klängen und Geräuschen, welche die Menschen durch Muskeltätigkeit erzeugen und mit gewissen Gedanken verknüpfen.

Die Erzeugung dieser Klänge und Geräusche soll uns jetzt beschäftigen. Wir beginnen mit der Erzeugung der Stimme.

I. Die Stimme.

1. Die Zungenpfeifen und ihre Klänge.

Die Stimme des Menschen und der ihm nahestehenden Geschöpfe wird im Kehlkopf erzeugt, der im wesentlichen nach Art einer sogenannten Zungenpfeife tönt.

Wir unterscheiden in der Akustik zweierlei Arten von Pfeifen; die eine Art sind die Lippenpfeifen, in denen ein gleichmäßiger Luftstrom aus einem schmalen Spalt auf eine scharfe Kante (Lippe) geblasen, hierdurch erschüttert und durch einen daran befindlichen Resonanzraum, meistens eine Röhre von bestimmter Länge, in rhythmische Schwingungen versetzt wird, vergleichbar einem Pendel mit einer schweren Linse, welcher durch allerhand verschieden starke und verschieden häufig erfolgende Anstöße doch in die ihm eigentümliche Schwingung versetzt wird. Dergleichen Töne (Pfeiftöne) werden im Kehlkopf nicht oder nur in äußerst seltenen Fällen (F. Semon, P. Schultz u. A.) erzeugt, wohl aber durch die Lippen des Mundes, wenn durch sie und die Zunge in bestimmter Weise Hohlräume gebildet werden, welche man durchbläst.

Die zweite Art der in der Akustik üblichen Pfeifen sind die Zungenpfeifen, so genannt, weil ein, seltener zwei elastische Blätter (Zungen) durch einen gleichmäßigen Luftstrom in Bewegung gesetzt werden und indem sie durch ihre periodischen Schwingungen den Luftstrom unterbrechen, d. h. die zusammengepreßte Luft bald frei herauslassen, bald ihr den Austritt verwehren, zu Luftstößen Veranlassung geben, welche ähnlich denjenigen bei einer Sirene den Klang veranlassen. Denn wenn wir uns die einfachste Form einer Sirene, d. h. eine sich drehende Pappscheibe vorstellen, die an ihrer Peripherie gleich abständige Löcher oder radiale Schlitze hat, gegen welche mit einem passenden Rohr geblasen wird, so erhält die Luft jenseits der Scheibe jedesmal einen Stoß, sobald das Rohr einem Loch gegenübersteht. Die schnell aufeinanderfolgenden Luftstöße erzeugen den Klang. Es ist also nicht die schwingende Zunge an sich, welche tönt, sondern sie veranlaßt durch ihre Schwingungen nur Luftstöße, die den Klang bilden. Eine schwingende Saite irgendeines Saiteninstrumentes erzeugt, namentlich in Verbindung mit einem passenden Resonanzraum einen ziemlich lauten Klang. Würden aber nur die menschlichen Stimmbänder schwingen, so stark wie sie es bei der lautesten Stimme tun ohne kräftige Luftstöße zu erzeugen, so hörten wir sicher so gut wie gar nichts, vielleicht nur ein ganz leises Summen, gerade so wenig wie wir das laute Puffen einer Lokomotive hörten, wenn nur die Dampfschieber hin und her getrieben würden, aber keinen gespannten Dampf herausließen. Es ist diese Tatsache besonders zu betonen, weil in Sielen, namentlich populären Lehrbüchern die dache anders dargestellt wird, indem man von ven „tönenden Stimmbändern" spricht, wie etwa von tönenden Saiten eines Klaviers.

Es gibt verschiedene Arten von Zungenpfeifen, zunächst solche mit starren und dann solche mit membranösen Zungen. Immer aber müssen die Zungen elastisch sein.

Die einfachsten und am meisten gebräuchlichen Zungen sind durchschlagend und einschlagend wie in vielen Orgelpfeifen und in der Harmonika. Sie haben — im Durchschnitt schematisch gezeichnet — folgendes Aussehen (s. Fig. 1a). In dem Rohrstück R_1 R_2 R_3 R_4, in welchem von unten her Luft eingeblasen wird, sitzt oberhalb des Rohrstückes W, des sogenannten Windrohres (natürlich wie das Ansatzrohr A verlängert zu denken) die Zunge Z. Ihrem freien Ende gegenüber befindet sich ein Gegenlager. Wird die Zunge von unten her angeblasen, so fängt sie an zu schwingen und sperrt nahezu das Windrohr (W) von dem Ansatzrohr (A) ab, wenn sie sich nach oben bewegt; gestattet aber der Luft den Austritt aus W, wenn sie sich nach unten in das Windrohr hineinbewegt (s. die S-förmig gebogene Linie in Fig. 1a); es ist eine sogenannte einschlagende Zunge.

Diesen Zungen stehen gegenüber die ausschlagenden, wie sie Figur 1b zeigt. Die Verbindung von Wind- und Ansatzrohr wird hergestellt, wenn die Zunge in das Ansatzrohr (A) hineinschlägt, (Sogenannte ausschlagende Zunge.) Hierzu die praktische Bemerkung, daß man ein und dieselbe Zunge nicht zu gleicher Zeit als ein- und als ausschlagende anwenden kann, indem man einfach das Ansatzrohr mit dem Windrohr vertauscht. Die Zunge spricht, gewöhnlich nur in einer Richtung angeblasen gut an und zwar meistens nur dann, wenn sie — wie fast immer — einschlagend gestellt ist. Auch ist hierbei die Stärke des Anblasens von Bedeutung; zu stark oder zu schwach angeblasen, schweigt sie still.

Der Verschluß der Zunge kann aber noch dichter gemacht werden, wenn man sie nicht bloß durch das Gegenlager hindurchschwingen, sondern auf dasselbe aufschlagen läßt (aufschlagende Zunge s. Fig. 1c), dabei ist es wiederum möglich, daß die Zunge, wie gewöhnlich, einschlagend (Fig. 1c) oder wie nur ausnahms-

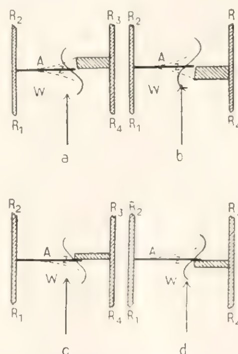


Fig. 1. a durchschlagend, einschlagend. b durchschlagend, ausschlagend. c aufschlagend, einschlagend. d aufschlagend, ausschlagend.

weise, auch ausschlagend (Fig. 1d) gestellt ist. Derartige Zungen finden sich in Orgelpfeifen (vox humana) und in der Klarinette.

Die Zungen können ferner auch membranös sein, indem z. B. eine zweckmäßig angespannte Kautschukmembran den kontinuierlichen Luftstrom in einen inter- oder remittierenden umwandelt. Hierbei können dieselben Verhältnisse obwalten, wie bei den Pfeifen mit starren Zungen. Etwas Neues aber tritt dadurch hinzu, daß membranöse (selten starre) Zungen vielfach doppelt sind, so daß eine Zunge gegen die andere sich bewegt, wobei sie entweder aneinander vorbeischwingen (durchschlagend sind) oder gegeneinander anschlagen (den aufschlagenden analog sind). Die Stimmbänder des Kehlkopfes — neuerdings häufig Stimmlippen genannt —, die Lippen des Trompetenbläsers, die hölzernen Zungen der Oboe sind derartige Doppelzungen (s. Fig. 2), in welcher a eine durchschlagende zweilippige und b eine gegenschlagende zweilippige (membranöse) Zungenpfeife darstellt, wie solche Johannes Müller zur Erläuterung des menschlichen Kehlkopfes anwendete.

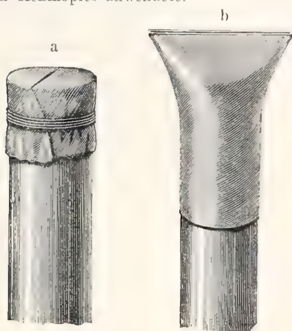


Fig. 2. a elastische Doppelzunge, durchschlagend. b elastische Doppelzunge, gegenschlagend. Nach J. Müller.

Schließlich sei noch einer ganz besonderen Art von Zungenpfeifen gedacht, die erst vor einigen Jahren von J. R. Ewald konstruiert worden sind und dem menschlichen Kehlkopf am ähnlichsten sein sollen. (Ganz kürzlich hat Wethlo Versuche mit ihnen angestellt.) Ewald nennt sie Polsterpfeifen. Sie haben folgenden Bau (s. Fig. 3). In einer Röhre befinden sich (und zwar in einer erweiterten Stelle derselben) zwei einander gegenüberstehende elastische Polster, die entweder in sich elastisch sind und gegen eine feste Wand gedrängt werden (Fig. 3 A), oder, indem sie selbst fest sind, zwischen sich und der festen Wand ein elastisches Zwischenstück (eine Feder) tragen (s. Fig. 3 B). Die Pfeife A, deren Lippen von unten her abgeschrägt sind, spricht nur von unten an (s. die Richtung des Pfeiles), die Pfeife B aber von beiden Seiten. Der wesentliche Unterschied zwischen den gewöhnlichen Zungenpfeifen und den Polsterpfeifen besteht darin, daß die letzteren den Luftstoß aus dem Windrohr gestatten, indem sie sich in horizontaler Richtung, also senkrecht zur Richtung des Luftstromes, seitlich voneinander entfernen, während die gewöhnlichen Zungen sich wesentlich in der Richtung des Luftstromes bewegen. Die gewöhnlichen Zungenpfeifen entsprechen etwa unseren gewöhnlichen Türen, die Polsterpfeifen dagegen den selteneren Schiebetüren.

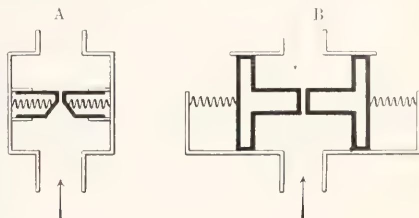


Fig. 3. Ewaldsche Polsterpfeifen. A nur von unten anzublasen. B von oben und von unten anzublasen.

Die Klänge der Zungenpfeifen. Wenn die uns umgebende Luft ausreichend schnell und ausreichend stark in der möglichst einfachen Art, d. h. so wie ein aufgehobenes Pendel erst mit geringer, dann mit immer größerer und schließlich wieder mit abnehmender Geschwindigkeit sich hin und her bewegt, so hört unser Ohr infolge dieser einfachen pendelartigen Schwingungen der Luft einen einfachen Ton ohne jedwede Neben- oder Obertöne (Helmholtz). Eine Stimmgabel mäßig stark angeschlagen und vor einen passenden Resonator gehalten, erzeugt solch einen einfachen Ton. Wenn aber ein tönender Körper bezw. die von ihm in Bewegung versetzten Luftteilchen sich anders bewegen, z. B. so, daß sie schnell in einer Richtung, aber langsam in der entgegengesetzten Richtung schwingen, wie das z. B. eine mit einem Bogen angestrichene Violinseite tut, so hört man, falls die Luftteilchen ebensoweit von ihrer Gleichgewichtslage abweichen, wie bei den Stimmgabelschwingungen und ihre Schwingungen in der Zeiteinheit ebenso häufig wiederkehren (s. Fig. 4), zwar einen gleichstarken und gleichhohen Klang wie bei der Stimmgabel; derselbe hat aber eine ganz andere Klangfarbe und enthält neben dem Grundton, wovon man sich durch besondere Versuche überzeugen kann, vielfache sogenannte harmonische Obertöne, deren Schwingungszahlen im Verhältnis zu der des Grundtones wie die gewöhnlichen Zahlen 1, 2, 3 usw. zunehmen und die mit dem Grundton je nach ihrer Stärke und Art gemischt die verschiedene Klangfarbe eines Klanges bedingen (Helmholtz). Es ist ohne weiteres klar, daß je einfacher die Schwingungen eines Klanges sind, d. h. je weniger sie sich von den Schwingungen einer Stimmgabel unterscheiden, sie auch in der Regel um so einfacher, obertonärmer sein werden, je mehr sie aber von den einfachen Schwingungen abweichen, auch um so reicher an Obertönen sein müssen, wodurch sie meistens voller, vielfach auch schärfer und durchdringender werden gegenüber den obertonlosen weichen Stimmgabeltönen.

Nun gibt es kaum einen größeren Unterschied zwischen dem ruhigen, ich möchte fast sagen, gemütlichen Hin- und Herschwingen eines Pendels und einer anderen periodischen Bewegung, z. B. einer solchen, bei welcher das Pendel von seiner größten Ausschlagsweite blitzschnell nach der anderen Seite hinüberspringt, hier längere Zeit still steht und ebenso schnell wieder zurückspringt. Ein Klang, der durch derartige Be-



Fig. 4. Die stark gezeichnete, gewellte Linie ist eine Stimmgabelkurve (sogenannte Sinuskurve). Die Stimmgabelzinken bezw. die Luftteilchen bewegen sich erst langsam, dann schneller und dann wieder langsam. Hierauf in der gleichen Art in entgegengesetzter Richtung zurück wie ein Pendel. Die schwach gezeichnete, gezackte Linie entspricht den Schwingungen einer angestrichenen Violinsaite (etwas schematisiert). Sie bewegt sich langsam hin, wenn sie am Bogen klebt, und sehr schnell zurück, wenn sie der Bogen losläßt.

wegungen eines Körpers erzeugt wird, muß sich sehr weit von dem einfachen, milden Ton einer Stimmgabel entfernen; er muß sehr reich sein an Obertönen und demnach jene obengenannten Eigenschaften besitzen.

Wie steht es nun mit den Erschütterungen, welche die Zungenpfeifen der uns umgebenden Luft erteilen? Nun, wie schon angedeutet, sind sie jenen eben genannten stoßweisen Bewegungen sehr ähnlich. Denn die Luft in dem Ansatzrohr erhält ja immer einen Stoß, wenn die Zunge der in dem Windrohr zusammengepreßten Luft den Durchtritt in das Ansatzrohr gestattet; dann steht sie kurze Zeit still, um wieder gestoßen zu werden u. s. f. Am kürzesten und schärfsten sind diese Stöße, wenn die Verschlüsse zwischen ihnen und dem Gegenlager, oder bei Doppelzungen zwischen ihnen allein möglichst dicht sind. Das erfolgt namentlich bei aufschlagenden Zungen; bei durchschlagenden aber annähernd nur dann, wenn die Zunge haarscharf durch ihren Rahmen hindurchfliegt.

Ich habe die Schwingungen verschiedener Zungen aufgezeichnet. Während größere und schwerere, namentlich membranöse Zungen pendelartig schwingen, wie dies Helmholtz feststellte, so bewegen sich leichte Metall- oder Holzzungen, z. B. die der Clarinette, so wie die nebenstehenden Kurven dies zeigen. In Figur 5a fliegt die Zunge, mit einem nicht zu langen Ansatzrohr versehen, infolge der gerade bestehenden Luftverdünnung abwärts auf die Unterlage und bleibt an ihr kleben. Die nächste Luftverdichtung treibt sie von der Unterlage ab und es erfolgt der Luftstoß. Verlängert man das Ansatzrohr, so werden die Stöße seltener und dauern längere Zeit (s. Fig. 5b).

Aus alledem folgt also, was auch für die Lippen des Kehlkopfes von größter Wichtigkeit ist, daß die Klänge von Zungenpfeifen, namentlich aufschlagender oder gegenschlagender, außerordentlich reich an Obertönen und demnach im allgemeinen voll, durchdringend oder scharf sind.

Die Tonhöhe dieser Klänge hängt natürlich wie bei einer Sirene von der Zahl der in der Zeiteinheit erfolgenden Luftstöße ab; und zwar bestimmt zunächst die Zunge an sich die Höhe des Klanges. Kleine, stark elastische oder membranöse, stark gespannte Zungen schwingen bekanntlich schnell und erzeugen an sich, d. h. wenn sie angeschlagen oder gezupft werden, in der Regel hohe, nebenbei bemerkt, leise Klänge; umgekehrt erzeugen größere, wenig elastische, schwere oder wenig gespannte elastische Zungen tiefe Klänge. Haben die Zungen sehr geringe Massen und werden sie namentlich nur gut durch starken Luftdruck oder, was ziemlich dasselbe ist, durch starke Luftstöße angesprochen, so werden sie in ihren Schwingungen durch die Länge (oder Gestalt) des Ansatzrohres bestimmt, wie dies von den Holzblasinstrumenten und verschiedenen Trompeten bekannt ist.

Des weiteren hat auf die Höhe des Klanges einer Zungenpfeife Einfluß die Stellung der Zungenpfeife (ob z. B. einschlagend oder ausschlagend gestellt) und die Stärke des Anblasens. Vielfach erhöht namentlich bei membranösen Zungen die Stärke des Anblasens den Ton sehr bedeutend (J. Müller u. a.).

Die Stärke der Klänge von Zungenpfeifen wird wie bei allen anderen Klängen oder einfachen Tönen bedingt durch die Weite der hin und herschwingenden Luftteilchen. Je größer diese, ihre sogenannte Amplitude ist, um so lauter ist der Klang, wobei die Stärke des Klanges viel schneller wächst, als die Größe der Amplitude. Je höher der Luftdruck in dem Windrohr ist,

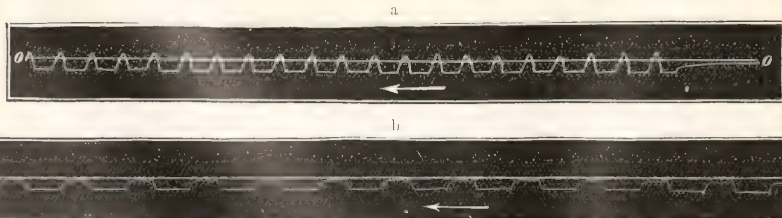


Fig. 5a und b. Schwingungskurven von zwei aufschlagenden Zungen. 00 die Nullagen der Zungen. Die Kurve in Figur 5a gibt einen höheren, die in Figur 5b einen tieferen Ton. Die Kurven sind von rechts nach links zu lesen.

um so stärker sind — innerhalb gewisser Grenzen — die schnell einander folgenden Luftstöße, und um so weiter werden jedesmal die Luftteilchen von ihrer Gleichgewichtslage entfernt. Das Entgegengesetzte findet bei schwachem Anblasen statt. Zu starkes oder zu schwaches Anblasen bringen die Pfeifen oft gar nicht zum Tönen.

2. Der menschliche Kehlkopf. 2a) Anatomie. *a*) Das Gehäuse des Kehlkopfes. Indem wir hier von einer eingehenden anatomischen Beschreibung des menschlichen Kehlkopfes absehen, sei nur das Folgende, wohl zum allgemeinen Verständnis Notwendige erwähnt.

Der Kehlkopf ist im wesentlichen ein festes, rundliches Gehäuse, welches zunächst aus einem siegelringartigen Knorpel (Ringknorpel, Cartilago cricoidea) besteht. Die Siegelplatte liegt nach hinten, der schmale Teil des Ringes nach vorn. Von links und rechts her, symmetrisch zur Siegelplatte wird der Ringknorpel von einer viel größeren, hinten offenen, nahezu rechtwinklig gebogenen Platte umfaßt. Sie heißt, weil sie ungefähr die Gestalt eines Schildes hat, Schildknorpel (Cartilago thyreoidea) und endet an ihren Hinterseiten oben und unten je in ein Horn. Zwischen dem unteren Horn und dem Ringknorpel findet sich ein Gelenk (s. Fig. 6 bei Ci), so daß sich diese beiden Knorpel um eine quere, nahezu horizontale Achse gegeneinander bewegen können. Kippt der Schildknorpel t vorn abwärts oder der Ringknorpel cr vorn aufwärts oder findet beides statt, so wird der vordere mittlere Teil des Schildknorpels, etwa die Gegend über t (s. Fig. 6), von einem an der hinteren, oberen Spitze des Ringknorpels gelegenen Punkte entfernt, ein zwischen diesen beiden Punkten befestigter Strang, das ist, nebenbei bemerkt, das Stimmband, gedehnt und gespannt. Die entgegengesetzten Bewegungen erschlaffen es.

Der dritte Knorpel des Kehlkopfes ist paarig und steht an Größe hinter den beiden erstgenannten, welche die ganze Gestalt des Keklkopfes bestimmen, bedeutend zurück; es sind dies die sogenannten Gießbeckenknorpel (Cartilagines arytaenoideae). Sie haben ungefähr die Gestalt von länglichen dreiseitigen Pyramiden, deren nach innen und vorn gelegene Spitzen (s. Fig. 7 Pv) dem hinteren Ansatz der Stimmbänder, während die nach außen und hinten gelegenen (Pm) dem Ansatz von Muskeln dienen (Processus vocalis und muscularis). Mit ihren unteren gehöhlten Flächen sitzen sie links und rechts oben auf dem Ringknorpel auf, mit welchem sie durch Gelenke verbunden sind. Die beiden Gelenkflächen des Ringknorpels sind im wesentlichen Teile von hervorspringenden, nach innen und abwärts ziehenden Zylinderflächen, auf welchen die viel kleineren ausgehöhlten Zylinderflächen des Gießbeckenknorpels aufsitzen. So können sie sich um die beiden schrägen Zylinderflächen drehen, wodurch die vorderen Teile der Gießbeckenknorpel sich nähern oder voneinander entfernen. Im ersteren Fall senken sich zugleich (Stieda und Will) ihre Stimmfortsätze bezw. die an ihnen befestigten Stimmbänder ein wenig, im zweiten heben sie sich. Auch ist bei der Schlaffheit der Gelenke ein geringfügiges Gleiten der Knorpel längs der Zylinderfläche

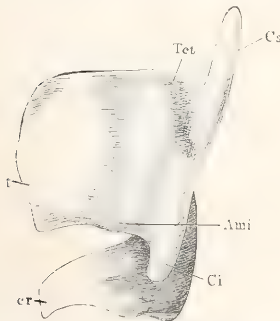


Fig. 6. Kehlkopfknorpel von der Seite. t Cartilago thyreoidea, Schildknorpel. cr Cartilago cricoidea, Ringknorpel. Cs Cornu superius, oberes Horn. Ci Cornu inferius, unteres Horn, das auf seiner inneren Fläche mit dem Ringknorpel eingelenkt ist. Da etwa, wo die Linie von Ci hintrifft, ist das Ende der Drehachse. Nach Henle.

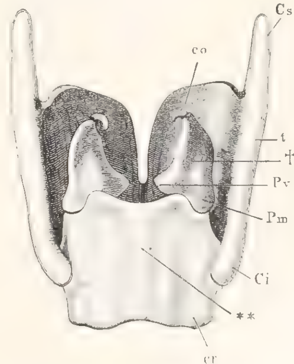


Fig. 7. Kehlkopfknorpel von hinten. Cs oberes, Ci unteres Horn der Cartilago thyreoidea, t. cr Cartilago cricoidea. Pm, Pv Processus muscularis und vocalis der Gießbeckenknorpel †, co die kleinen Cartilagines corniculatae oder Santorinischen Knorpel. Nach Henle.

sowie eine geringfügige Drehung um ihre vertikalen Axen möglich. Auf den oberen Enden der Gießbeckenknorpel sitzen noch ein Paar kleine, wohl nicht wichtige Knorpel, die Cartilagines corniculatae (c o) oder Santorinischen Knorpel auf.

Ueber dem ganzen Kehlkopf aber, gewissermaßen ihn von vorn und oben her schützend, befindet sich eine Platte aus gelbem elastischem Knorpel, während die bisher genannten Stücke alle aus weißem, ziemlich festem, und vielfach verknöchertem, hyalinem Knorpel bestehen. Diese biegsame gelbe Platte ist die Epiglottis oder der Kehldeckel, welche den Kehlkopf nach oben abschließt.

Nach unten, also an den Ringknorpel, setzt sich der oberste Ring der Luftröhre und weiter die ganze Luftröhre an, das Windrohr für die Zungenpfeife des Kehlkopfes.

β) Die äußeren Muskeln und Bänder des Kehlkopfes. Das knorpelige Gehäuse des Kehlkopfes wird von innen und von außen mit wichtigen Gebilden überzogen. Abgesehen von dem Bindegewebe und den elastischen Bändern, welche die Knorpel miteinander verbinden, setzen sich außen auf die Platten des Schildknorpels ziemlich kräftige und lange Muskeln an, von denen die einen nach oben, an das Zungenbein, die anderen nach unten, an das Brustbein verlaufen. Diese beiden Muskeln arbeiten gegeneinander; sie sind Antagonisten, indem bei festgestelltem Zungenbein der obere, der hyo-thyreoideus, den Kehlkopf nach oben zieht, der andere dagegen, der sterno-thyreoideus nach dem Brustbein hinabbewegt. Dabei werden aller Wahrscheinlichkeit nach (C. Mayer, Vierordt, Steiner) durch Umkippen des Schildknorpels (s. Fig. 6) beim Heben des Kehlkopfes die Stimmbänder etwas gespannt, beim Herabziehen desselben ein wenig entspannt. Wohl immer sind beide Muskeln zu gleicher Zeit tätig und halten den Kehlkopf, wie das bei der Stimmerzeugung geschieht, in höherer oder tieferer Lage fest.

γ) Die Stimmbänder und die inneren Muskeln des Kehlkopfes. Im Innern des knorpeligen Kehlkopfgehäuses befinden sich nun als wichtigste Organe die wahren Stimmbänder, nach ihren Ansatzpunkten genannt Ligamenta thyreo-arytaenoidea inferiora, weil über ihnen noch zwei ähnliche vorspringende Schleimhautfalten sich finden, die Ligamenta thyreo-arytaenoidea superiora oder falschen Stimmbänder, welche mit der Stimmbildung unmittelbar nichts zu tun haben. Die wahren Stimmbänder oder, wie man jetzt vielfach zweckmäßiger sagt, die Stimmlippen (denn sie gleichen in der Tat bei der Erzeugung der Stimme den Lippen des Trompetenbläsers) entspringen in dem vorderen Winkel des Schildknorpels in der Nähe des sogenannten „Adamsapfels", etwa in der Mitte der vorderen Kante des Schildes und enden hinten jederseits an der vorderen inneren Seite des Gießbeckenknorpels, den Stimmfortsätzen (Processus vocales).

Ihr Bau bedarf einer besonderen Besprechung. Man möchte sagen, daß die Natur eine besondere Sorgfalt auf ihren Bau verwendet hat. Schon ihre Befestigung in dem Winkel des Schildknorpels zeigt nach Untersuchungen von Katzenstein ein wunderbar kompliziertes Netzwerk von elastischen Fasern, welches offenbar dazu dient, diesem elastischen Gebilde bei verschiedenen Zugrichtungen seine Gestalt zu sichern. Das Stimmband als Ganzes jederseits stellt einen in die Mitte des Kehlkopfes vorspringenden dreieckigen Wulst (s. Fig. 8, Tai. 5) dar, dessen äußere (laterale) Seite in die Kehlkopfwand übergeht, während die untere schräg lateral abwärts sieht, die obere aber nahezu wagerecht steht. Es ist von einer drüsenreichen Schleimhaut überzogen, die unter sich ein dichtes Geflecht elastischer Fasern zeigt, welche dem Band, namentlich seiner oberen Fläche, eine gelbliche Farbe verleiht. Die Fasern nahe der Spitze des Bandes verlaufen wesentlich von vorn nach hinten. In diesem von den beiden elastischen Platten gebildeten spitzen Flächenwinkel sitzt nun, den dreieckigen Raum ausfüllend, ein Muskel darin, der Musculus thyreo-arytaenoideus oder einfacher Musculus vocalis, der Stimmmuskel (s. Fig. 8, Tai). Er ist,

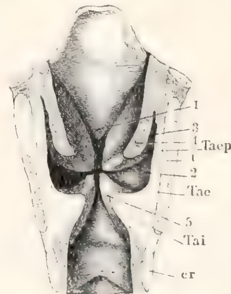


Fig. 8. Durchschnitt des Kehlkopfes in der Stirnrichtung (Frontalschnitt) von hinten gesehen. t Cartilago thyreoidea, cr Cartilago cricoidea, 1 Wulst der Epiglottis, 2 Ventriculus Morgagni mit seiner Vertiefung (Sinus) 3, 4 oberes (falsches) Stimmband, 5 untere Plica thyreo-arytaenoidea (wahres Stimmband), Taep Musculus thyreoary-epiglotticus. Tae, Tai Musculus thyreo-arytaenoideus externus und internus oder vocalis, im Stimmband gelegen. Nach Henle.

wie ich namentlich durch mikroskopische Präparation zeigen konnte, ein ungemein kompliziert gebauter Muskel, der, um hier nur das Wesentliche mitzuteilen, zunächst Faserzüge von vorn nach hinten zeigt, die wesentlich nahe dem medialen Rand der Stimmbänder verlaufen (s. Fig. 9 Thai 2). In erschlafftem Zustand zeigen sie eine nach innen (medial) gerichtete Konkavität. Zu diesen Fasern gesellen sich aber ferner schräg von unten medial, d. h. von dem elastischen Ueberzuge der unteren Stimmbandfläche nach oben lateral aufsteigende Fasern, die ebenfalls in das Stimmband eintreten und oben in ihm enden (Thai 1). Sie grenzen lateral an Fasern des Musculus thyreo-arytaenoideus externus, in welche sie auch übergehen. Andere ebenfalls nach oben, aber mehr von hinten kommende Fasern entspringen von dem Processus vocalis und enden an der elastischen freien Stimmbandkante und an der medialen Fläche des Stimmbandes. Vielfach verflechten sich diese Muskelfasern in dem Stimmuskel selbst.

Was ist nun die Bedeutung dieses komplizierten Muskelgebildes? Wie begreiflich, ist die Frage nicht leicht zu beantworten. Zunächst ist soviel klar, daß, wenn sich der Muskel und zwar haupsächtlich in seinen sagittalen Fasern (Thai 2) zusammenzieht, er die elastischen Massen des Stimmbandes, welche sich wesentlich an denselben Punkten, wie er ansetzen, erschlaffen muß; damit ist aber nicht gesagt, daß diese Erschlaffung für sich allein im normalen Leben tatsächlich vorkommt. Denn bei jeder, ich möchte sagen, physiologischen Bewegung, ist niemals ein einziger Muskel, sondern sind immer viele Muskeln beteiligt.

Ist der Musculus vocalis experimentell (bei Tieren) oder durch Krankheit (bei Menschen) gelähmt, so behalten die sagittal, nahe der Mittellinie des Stimmbandes verlaufenden Fasern ihre konkave Ausbuchtung und übertragen sie dem Stimmband. Auch dieses zeigt eine geringe Einbuchtung.

Die wesentliche Bedeutung des Musculus vocalis liegt offenbar in der Herrichtung des Stimmbandes zum Tönen. Er verleiht zunächst dem Stimmband eine für die Ansprache günstige Stellung, indem er mit seinem außen anliegenden Gefährten, dem Thyreo-arytaenoideus externus die Stimmbänder von unten nach oben verkürzt und sie nach der Mitte zu drängt. Das tun seine im wesentlichen vertikal aufsteigenden Fasern. Ferner wird durch die Zusammenziehung seiner horizontalen und schrägen Muskelfasern, die sich teilweise miteinander verflechten, der Muskel in dem gespannten Stimmband, das seine Länge beibehält, selbst stark gespannt. Es wird gewissermaßen eine gespannte, statt einer schlaffen Saite in das Stimmband eingesetzt.

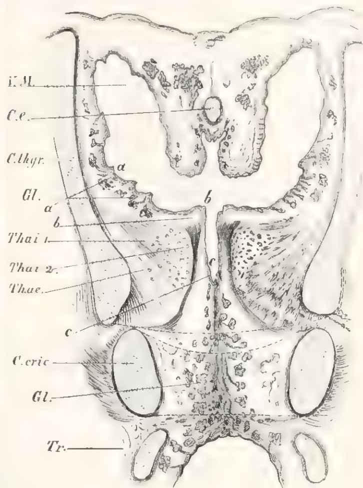


Fig. 9. Frontalschnitt eines menschlichen (kindlichen) Kehlkopfes durch das vordere Drittel der Stimmbänder. V. M. Ventriculus Morgagni, C. e. Cartilago epiglottica, C. thyr. Cartilago thyreoidea, Gl. Drüsen, Thai 1 schrägaufsteigende Fasern des Musculus vocalis, Thai 2 quergetroffene Längsfasern desselben Muskels, Thae Musculus thyreo-arytaenoideus externus nach außen links, halb schematisch der Musculus crico-thyreoideus. C. cric. Cartilago cricoidea, Tr Trachealknorpel. a, b, c Schleimhaut des Kehlkopfes, b Spitze des Stimmbandes. Nach Grützner.

Weiter gehört zu den Muskeln, welche sich zwischen den einzelnen Knorpeln des Kehlkopfes ausspannen, der Musculus cricothyreoideus anticus, der, wie der Name besagt, auf der vorderen Seite des Kehlkopfes liegt und an dem Ring- und Schildknorpel befestigt ist. Er besteht aus zwei Portionen, einer mehr senkrechten (s. Fig. 10, Ctr) und einer schrägen (Cto). Die erstere entspringt vorn dicht neben der Mitte des Ringknorpels und steigt ein wenig schräg lateral aufwärts an den unteren Rand des Schildknorpels. Die zweite schräge Portion entspringt etwas weiter seitlich von der Mitte des Ringknorpels und steigt schräger, also mehr lateral und sogar rückwärts hinauf, um sich an dem unteren Rande des Schildknorpels bis an sein unteres Horn zu befestigen. Von vorn betrachtet bilden die beiden senkrechten Partien des rechten und linken Muskels einen

Winkel von etwa 30°, die beiden schrägen ungefähr einen rechten (s. Fig. 10).

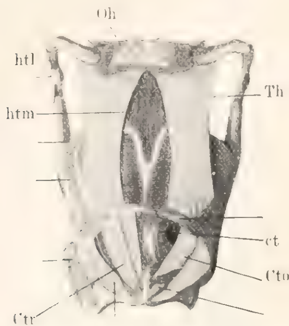


Fig. 10. Zungenbein (Oh) und Kehlkopf von vorn, htl und htm elastische Bänder zwischen Zungenbein und Kehlkopf (Cartilago thyreoidea), ct ähnliches Band zwischen Schild- und Ringknorpel, Th Muskel zwischen Zungenbein und Schildknorpel (Musculus thyreo-hyoideus), Ctr und Cto gerade und schräg aufsteigende Portion des eigentlichen Stimmbandspanners (Musculus crico-thyreoideus anticus, rectus und obliquus). Nach Henle.

Die Tätigkeit des Muskels für sich allein betrachtet ist klar. Er bewegt die beiden großen Kehlkopfknorpel, den Ring- und den Schildknorpel mit ihren vorderen Teilen gegeneinander und vermindert, indem sie sich in dem Gelenk zwischen den beiden Knorpeln (s. Fig. 6) drehen, ihre vordere Entfernung. Hierdurch werden die Stimmbänder verlängert, also gedehnt, sei es, daß bei stillstehendem Ringknorpel der Schildknorpel nach vorn und abwärts gekippt oder bei stillstehendem Schildknorpel der Ringknorpel an den Schildknorpel herangehoben wird. Im ersteren Fall wird der vordere Ansatz des Stimmbandes nach vorn, im zweiten der hintere Ansatz nach hinten bewegt. Letztere Bewegung wird als die regelmäßige betrachtet (Juracz, Jelenffy, Barth u. a.), wofür auch Röntgenaufnahmen sprechen dürften (Jörgen, Möller und J. F. Fischer). Der Muskel, namentlich seine schrägen Fasern, trägt ferner dazu bei, den Schildknorpel an den Ringknorpel heranzuziehen und ihn seitlich zusammenzudrücken, wodurch er, was bei der Stimmerzeugung wichtig ist, eine Festigung des Kehlkopfgerüstes zur Folge haben kann. Bei einigermaßen weichen Schildknorpeln können wohl auch ihre beiden Hälften einander ein wenig genähert und unter Verkleinerung ihres Winkels, mit dem sie vorn zusammenstoßen, der Adamsapfel etwas vorgetrieben, die Stimmbänder stärker gespannt werden (Steiner). Durch Pressung oder Zug von außen kann man ähnliche Wirkungen erzielen.

Seine isolierte Lähmung infolge von Krankheit beim Menschen oder durch experimentellen Eingriff beim Tier entspannt die Stimmbänder und hat eine rauhe Stimme zur Folge, seine elektrische Reizung ein Heraufheben des Ringknorpels an den Schildknorpel.

Der Musculus crico-thyreoideus posticus ist ein kleiner unbedeutender Muskel, der, auf der hinteren Seite des Kehlkopfes gelegen, wohl zur Befestigung der beiden großen Knorpel etwas beiträgt.

Viel wichtiger und geradezu lebenswichtig ist ein größerer Muskel, der mit seinem Fleische jederseits auf der hinteren großen Fläche des Ringknorpels, der Siegelfläche des Ringes, aufsitzt. Seine Fasern steigen schräg von der Mitte lateralwärts in die Höhe, um an dem Muskelfortsatz des Gießbeckenknorpels zu endigen, daher Musculus crico-arytaenoideus posticus, vielfach kurz posticus genannt (s. Fig. 11 Cap). Er dreht somit diese Fortsätze nach innen, wodurch die Stimmritze (hinten) erweitert wird; dies findet bei gewöhnlicher Einatmung nicht bei allen Personen und überhaupt in geringem Maße, bei tiefer aber in hohem Maße statt. Denn wenn man viel Luft braucht, muß vor allen Dingen die Eingangspforte der Luft durch den Kehlkopf eine weite sein. So versteht man auch die mehr oder weniger starke Atemnot und die inspiratorischen Geräusche, wenn, wie bei Lähmung dieses Muskels, die Stimmritze in der Einatmung sich nicht ge-

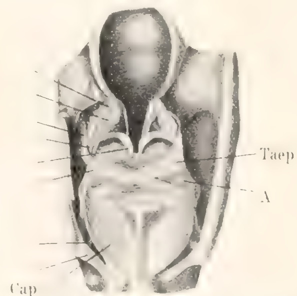


Fig. 11. Kehlkopf von hinten freigelegt; die linke Platte des Schildknorpels teilweise entfernt. Taep Musculus thyreo-aryepiglotticus (in seinen gekreuzten Anfängen auf der Ringplatte auch Arytaenoideus obliquus genannt), A Musculus arytaenoideus transversus, Cap Musculus crico-arytaenoideus posticus. Nach Henle.

nügend erweitern kann. Bei einseitiger Lähmung bleibt das gelähmte Stimmband nahe an der Mittellinie stehen, das ungelähmte geht möglichst weit nach außen von dem gelähmten fort, um der Luft freien Weg zu schaffen.

Des weiteren liegen hinten noch auf der Rückfläche der Gießbeckenknorpel der ziemlich kräftige M. arytaenoideus transversus und über ihm die gekreuzten Fasern des M. arytaenoideus obliquus, die sich nach seitwärts und vorn ziehen und teilweise bis in die Epiglottis einstrahlen. Beide Muskeln nähern die Gießbeckenknorpel einander namentlich in ihren hinteren Partien. Durchschneidet man sie, so bleibt das hintere Dreieck der Stimmritze offen und eine Stimmbildung ist gar nicht oder nur mit starken Nebengeräuschen möglich.

Zwischen Schild- und Gießbeckenknorpeln liegt außer dem schon oben erwähnten Musculus vocalis noch der platte M. thyreo-arytaenoideus externus, der vom Muskelfortsatz des Gießbeckenknorpels schräg nach abwärts und vorwärts an den Schildknorpel verläuft. Ziemlich in derselben Richtung und ebenfalls von dem Muskelfortsatz des Gießbeckenknorpels zieht nach vorn, aber zum Ringknorpel der M. crico-arytaenoideus lateralis. Die wichtigsten Kraftkomponenten in diesen beiden Muskeln verlaufen derart, daß sie die Muskelfortsätze des Gießbeckenknorpels nach innen drehen, die Stimmritze also schließen. Wird der letztere Muskel doppelseitig gelähmt, so bleibt die Stimmritze ihrer ganzen Länge nach offen stehen und es ist von keiner Stimmbildung die Rede. Wird nur ein Muskel gelähmt und kann sich das betreffende Stimmband nicht bis zur Mittellinie bewegen, so kommt behufs Stimmbildung das Stimmband der anderen Seite dem gelähmten weit über die Mittellinie entgegen, eine Tatsache, die meines Erachtens von hohem Interesse ist, da sie zeigt, daß ein Stimmband noch weit über die Mittellinie hinaus einen Druck auf das andere Stimmband ausüben kann.

Der Musculus thyreo-arytaenoideus externus unterstützt dann ferner durch seine ungefähr vertikalen Längsfasern die Vordrängung des Stimmbandes nach der Mitte zu und durch seine horizontalen Fasern entspannt er unter gewissen Bedingungen (s. oben Fig. 9) das elastische Stimmband und wirkt zudem ähnlich wie sein nach innen gelegener Genosse, der Musculus vocalis.

Schließlich seien noch muskulöse Faserzüge erwähnt, welche im wesentlichen von vorn und von hinten in die Epiglottis einstrahlen und bei der Aufrichtung bezw. Niederdrückung derselben beteiligt sind (Barth). Im ersten Fall ist der Blick in den Kehlkopf von oben her frei, im zweiten deckt der Kehldeckel den vorderen Teil der Stimmbänder zu (vgl. Fig. 14 und Fig. 19).

2b) Physiologie. α) Die indirekte Beobachtung des lebenden Kehlkopfes; der Kehlkopfspiegel. Wenn man auch schon seit geraumer Zeit herausgeschnittene Kehlköpfe von menschlichen und tierischen Leichen zweckmäßig hergerichtet und durch Anblasen von der Luftröhre aus zum Tönen gebracht hat, so ist doch die Beobachtung eines derartigen Kehlkopfes nur ein schwacher Ersatz für die Beobachtung eines lebendigen. Und obgleich das Genie von Johannes Müller viele wichtige (später zu erwähnende) Tatsachen aus den Versuchen an toten Kehlköpfen feststellen konnte, eines fehlt in einem toten Kehlkopf doch immer, nämlich das feine abgemessene Muskelspiel und die mannigfachen Spannungen der einzelnen Muskeln.

Ist es nun möglich, den lebenden Kehlkopf zu beobachten? Wie jeder weiß, lautet die Antwort: Ja. Freilich erst Mitte des vorigen Jahrhunderts erblickte zum erstenmal das Auge eines geistvollen Forschers einen singenden menschlichen Kehlkopf. Denn abgesehen von den glücklichen Erfolgen einiger Chirurgen, die sich den menschlichen Kehlkopf durch Spiegelung sichtbar machten oder bei Verletzungen unmittelbar sehen konnten, war es der spanische Gesanglehrer Manuel Garcia, der durch Einführung eines gestielten kleinen Spiegels in den Mund, so daß dieser Spiegel schräg über dem Kehlkopfseingang stand, sich den lebenden Kehlkopf im Spiegelbild sichtbar machte. Hierzu war freilich zweitens nötig, daß ausreichend Licht auf den Spiegel und in den Kehlkopf hineinfiel und das Auge des Beobachters sich in den Gang dieser Lichtstrahlen setzte. Garcia verwendete das Sonnenlicht. Es sei darauf hingewiesen, daß Garcia, welcher in körperlicher und geistiger Rüstigkeit am 17. März 1905 seinen 100jährigen Geburtstag feierte, glänzende Untersuchungen mit seinem Apparat machte. Seine Arbeiten blieben aber ziemlich unbekannt, so daß der Kehlkopfspiegel noch einmal von dem bekannten Wiener Arzt Türck erfunden und von ihm und Czermak in die medizinische Wissenschaft eingeführt wurde. Seine Handhabung lehrt Figur 13a und 13b.

Es dürfte sich empfehlen, gleich hier das Bild des normalen menschlichen Kehlkopfes bei ruhigem Atmen zu beschreiben (s. Fig. 14). Man sieht zunächst den mehr oder weniger weißlich belegten, bläulichroten Zungengrund (L), der mit einem kleinen Bändchen mit der Epiglottis E in Verbindung steht. Diese selbst erscheint in perspektivischer Verkürzung als gelblich gefärbter Bogen. In der Mitte des ganzen Bildes ist die mäßig weit geöffnete, nahezu dreieckige Stimmritze (R) mit vorderer Spitze zu sehen, in deren Tiefe die Ringe der Luftröhre erkannt werden: seitlich wird sie begrenzt von den wahren gelblichen Stimmbändern (L. v, Ligamenta vocalia), über denen die seitlich sie überragende rote Schleimhaut der falschen Stimmbänder (L. v. s, Ligamenta vocalia spuria) sichtbar wird. Eine spaltförmige Oeffnung (S.M.) führt in den Sinus Morgagni: SS sind die auf den Gießbeckenknorpeln, also hinten aufsitzenden kleinen Santorinischen und W die in dem binde-

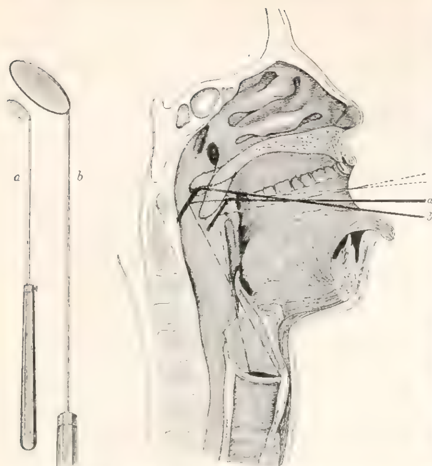


Fig. 12a u. b. Kehlkopfspiegel etwa zur Hälfte verkleinert.

Fig. 13a. Anwendung des Kehlkopfspiegels. Je nach seiner Haltung (siehe den Gang der punktierten Lichtstrahlen) sieht man bei a mehr die hintere, bei b, wobei zugleich das Zäpfchen zurückgedrängt wird, mehr die vorderen Teile des Kehlkopf-Innern. Nach Landois-Rosemann.



Fig. 13b. Handhabung des Kehlkopfspiegels bei künstlicher Beleuchtung. Das Licht der Lampe wird von dem in seiner Mitte durchsichtigen Hohlspiegel an der Stirn des Beobachters auf den Kehlkopfspiegel geworfen und in ihm der Kehlkopf gesehen. Nach Brünings.

gewebigen Band drinsteckenden Wrisbergschen Knorpel (W). P ist die Pharynxwand und S.P. zwei seitliche Ausbuchtungen, die Sinus pyriformes.

Auch wird neuerdings der Kehlkopf durch Apparate beobachtet, die denjenigen ähnlich sind, mit welchen man sich die Harnblasenschleimhaut sichtbar macht (Flatau u. A.).

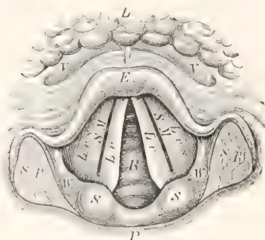


Fig. 14. Das Spiegelbild des menschlichen Kehlkopfes bei ruhiger Atmung. Näheres im Text. Nach Landois-Rosemann.

β) Die direkte Beobachtung des Kehlkopfes. In neuester Zeit ist es Kirstein gelungen, den Kehlkopf des Erwachsenen unmittelbar zu sehen. Vor allem aber war es Killian, der diese Methode der unmittelbaren Besichtigung zu höchster Vollkommenheit, namentlich für operative Zwecke gebracht hat. Seine Schüler



Fig. 15. Bild des Rachens und Kehlkopfes ohne jede Spiegelung unmittelbar gesehen vermittels der Schwebelaryngoskopie nach Killian. Der vordere kantige Spatel verdeckt den Kehldeckel.

Brünings u. a. haben sie dann noch, den Spuren des Meisters folgend, weiter entwickelt. Das Wesentliche derselben besteht in folgendem.

Entweder liegt die zu untersuchende Person auf dem Rücken und ist gewissermaßen an einem die Zunge zurückhaltenden spatelartigen Instrument aufgehängt (Schwebelaryngoskopie). Der mit einem lichtspendenden Stirnspiegel ausgestattete Beobachter sieht unmittelbar auf den Kehlkopf der Versuchsperson; seine beiden Hände sind vollkommen frei zum Operieren. Man sieht dann etwa folgendes Bild (s. Fig. 15). Die wahren und falschen Stimmbänder, die Stimmritze und in ihr die Ringe der Luftröhre, den Gaumen mit den Gaumenbögen und dem Zäpfchen. Die Epiglottis ist durch den Spatel verdeckt, die Zunge zur Seite gedrängt. Oder die Versuchsperson sitzt; dann wird von Brünings folgendes Verfahren angewendet. Ein rechtwinkliger Beobachtungsapparat (s. Fig. 16a), nämlich eine in den Mund bis nahe an die Stimmbänder geschobene, oben teilweise offene Metallröhre M wird durch eine am Ende des anderen rechtwinkligen Schenkels, den der Beobachter in der Hand hält, befindliche elektrische Lampe (L) beleuchtet, indem ein kleiner, in seiner Mitte offener Spiegel (Sp) ihr Licht in den Kehlkopf wirft (s. den Strahlengang der von der Lampe L ausgehenden Strahlen und die Blickrichtung des Beobachters in Figur 16a). Der Kehldeckel wird durch die Röhre nach vorn gedrückt, wozu wohl immer die Unempfindlichmachung des ganzen Kehlkopfes durch starke Kokainlösung notwendig ist.

Es ist mir nicht bekannt, daß man diese ganz neue Methode, die man übrigens nicht mit dem Namen Autoskopie belegen sollte (Fränkel), schon zu physiologischen Untersuchungen angewendet hätte, was sich sicher verlohnen würde, da alles, was sie zeigt, wie ich aus eigener Erfahrung weiß, in wunderbarer Klarheit und Helligkeit, im wahrsten Sinne des Wortes, wie zum Greifen vor einem liegt.

γ) Die koordinierten Bewegungen der Kehlkopfmuskeln. Wie bekannt, ist ein Muskel zwar meistens eine anatomische Einheit, d. h. man kann ihn mehr oder weniger leicht als ein Ganzes aus seiner Umgebung herauspräparieren und isolieren, aber er ist fast nie eine physiologische Einheit, d. h. in den allerseltensten Fällen, vielleicht niemals arbeiten alle Fasern eines Muskels zusammen in ihrer Gesamtheit und in gleicher Stärke. Prüft man die Tätigkeit verschiedener Muskeln bei irgendwelchen physiologischen Bewegungen, so wird man sehen, daß je nach der Stärke und Ausgiebigkeit der Bewegung, z. B. der Beugung des Vorderarmes, gewisse Anteile des hauptsächlich diese Bewegung ausführenden Muskels mit ihrer Tätigkeit beginnen, später andere, ziemlich gleichartig wirkende Muskeln (Agonisten) und zwar in ganz bestimmter Reihenfolge eingreifen. Diese alle aber sind keineswegs allein bei der Bewegung tätig, sondern zu gleicher Zeit spannen sich auch ihre Gegner, die betreffenden Antagonisten an; denn nur durch Zug und Gegenzug ist irgendeine, namentlich in ihrer Kraft fein abgestufte Bewegung auszuführen.



Fig. 16a. Unmittelbare Beobachtung des menschlichen Kehlkopfes. Nach Brünings. Der Kehlkopf wird durch die elektrische Lampe (L) vermittels des in der Mitte durchbrochenen Spiegels (Sp) grell beleuchtet und von dem Beobachter durch das Rohr M betrachtet. Dr die Drähte zur elektrischen Lampe. Halbschematisch.

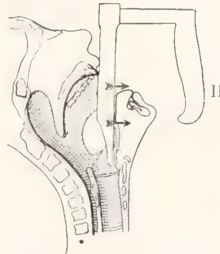


Fig. 16b. Der zum Herabdrücken der Zunge angewendete Bügel, dessen Handgriff H in die volle Hand genommen und gegen den Unterkiefer (s. die Pfeile) herabgedrückt wird.

Uebertragen wir diese Tatsachen auf die Kehlkopfmuskeln, so erkennt man schon ohne weiteres, wie unendlich verwickelt und schwer übersehbar ihre gemeinschaftliche, in bestimmter Art zusammengeordnete (koordinierte) Tätigkeit sein muß. Selbstverständlich hängt diese ab von höheren Einflüssen, d. h. von den nervösen Zentralorganen, in denen jene kombinierten Bewegungen der Muskeln, wie Oeffnen, Schließen, Einstellen der Stimmbänder zu hohen oder tiefen Tönen usf. einheitlich zusammengefaßt sind, so daß, wenn nur diese Gesamttätigkeit bewußt oder unbewußt gewollt wird, alle diese verschiedenen Einzeltätigkeiten der Muskeln von einem Orte aus in Gang gesetzt werden, „ein Schlag tausend Verbindungen schlägt“.

Das oberste Zentrum, von dem alle diese geordneten Bewegungen ausgehen, ist natürlich das Gehirn, insonderheit bestimmte Abschnitte der Großhirnrinde, die zuerst von H. Krause aufgefunden und von einer großen Reihe anderer Forscher bestätigt wurden. Sie liegen beim Hunde im Gyrus praecruciatus in der Nähe der Stelle, wo auch andere sogenannte motorische Zentren, z. B. diejenigen des Nackens und der Vorderextremitäten sich finden. Ihre einseitige elektrische Reizung bedingt Bewegung verschiedener Muskeln am Gaumen, sowie gegenseitige Annäherung beider Stimmbänder. Entfernung dieser Zentren macht aber die Hunde nicht völlig stumm, sondern stört nur mehr oder weniger die Stimmbildung. Erweiterung der Stimmritze, also Entfernung der Stimmbänder voneinander ist merkwürdigerweise durch Reizung der Zentra bei unverletztem Kehlkopf nicht zu erreichen, ein Beweis dafür, wie roh (wenn auch nicht unwichtig) im allgemeinen diese Versuche sind, indem durch die elektrische Reizung nur Massenwirkungen auf die entsprechenden Muskelwirkungen erzielt werden können. Feinere Tätigkeiten der Kehlkopfmuskeln, wie Stimmeinsätze etwa für hohe oder tiefe Töne und dergleichen sind durch Gehirnreizungen bis jetzt noch nicht erzielt worden. Diese Tätigkeiten im Verein mit den Atembewegungen werden von tieferen Stellen des Hirnes bis hinab zum Kopfmark, wo das sogenannte Atemzentrum liegt, und wenn man will, bis zum Rückenmark, von dem die verschiedensten Atemnerven ausgehen, regiert oder wenigstens beeinflußt.

Die nervösen (zentrifugalen) Bahnen, auf denen vom Zentrum aus die entsprechenden physiologischen Reize in die Muskeln geleitet werden, sowie diejenigen, welche von den empfindlichen Teilen des Kehlkopfes Erregungen zum Gehirn leiten, die zentripetalen Bahnen verlaufen alle in einem großen Nerven, dem Nervus vagus. Dabei sind, indem ich von den Einzelheiten in diesen Fragen absehe, alle zentrifugalen (motorischen) Fasern[1], in dem Nervus recurrens, einem großen Nebenast des Vagus, vereinigt, der alle Muskeln des Kehlkopfes versorgt mit Ausnahme eines einzigen, nämlich des vorn am Kehlkopf gelegenen Spanners, des cricothyreoideus. Die Durchschneidung oder Lähmung des Recurrens bedingt also nahezu vollständige Lähmung aller Kehlkopfmuskeln. Die sonst mit Blitzesschnelle sich bewegenden Kehlkopfmuskeln verharren träge und schlaff in einer gewissen Mittelstellung und ebenso natürlich die sonst von ihnen bewegten Stimmbänder, welche, wie Ziemssen sich ausdrückte, eine „Kadaverstellung“ einnehmen, die im übrigen sehr verschieden sein kann (Fein); denn der einzige noch bewegungsfähige Spanner ändert an der ganzen Haltung der Stimmbänder nicht viel. Es sei hierbei erwähnt, daß der linke Recurrens bei hochgradiger Erweiterung des Aortenbogens (sogenanntes Aneurysma Aortae) nicht selten gequetscht und gezerrt wird und seine Leitungsfähigkeit mehr oder weniger verliert. Hierbei pflegen die zu den Erweiterern der Stimmritze gehenden Fasern in der Regel früher gelähmt zu werden, als die anderen (Rosenbach, Semon), was von Grabower durch einen geringeren Nervengehalt der Erweiterungsmuskeln erklärt wird. Bei völliger Lähmung des linken Recurrens steht dann das linke Stimmband völlig still, während sich das rechte bei der Atmung, Stimmerzeugung usw. bewegt.

Die zentripetalen (sensiblen) Fasern des Kehlkopfes, die also wesentlich in der Schleimhaut endigen oder eigentlich anfangen, verlaufen in dem oberen Kehlkopfnerven, dem Laryngeus superior, welcher auch noch motorische Fasern für den Crico-thyreoideus führt. Seine Lähmung macht den Kehlkopf unempfindlich, was gelegentlich sehr gefährlich, ja lebensgefährlich werden kann, weil der Kehlkopf außerordentlich empfindlich und Sitz vielfacher lebenswichtiger Reflexbewegungen ist. Kommt beispielsweise ein Fremdkörper in die Nähe des Kehlkopfes, so schließen sich die Stimmbänder mit Blitzesschnelle und verhindern sein Eintreten in die Lunge. Gerät doch etwas Ungehöriges in die Luftröhre, wie beim „Verschlucken“, so wird es durch gewaltige, reflektorische Hustenstöße aus derselben entfernt, was aber bei einem unempfindlichen Kehlkopf nicht geschieht und zum Tode führen kann (Fremdkörperpneumonie). Zu gleicher Zeit wird durch seine Lähmung auch die Tätigkeit des Spanners der Stimmbänder aufgehoben.

Fragen wir uns nun, welches sind die wesentlichen durch die Kehlkopfmuskeln bedingten Haltungen der Stimmbänder, so dürften deren folgende vier zu nennen sein: 1. Die Ruhestellung der Stimmbänder, wie sie bei ruhigem Atmen beobachtet wird. Sie entfernt sich nicht viel von der oben erwähnten Kadaverstellung, welche das Ergebnis der vollkommenen Ruhe aller Kehlkopfmuskeln ist. Keiner von ihnen ist irgendwie gespannt. Vielfach bewegen sich allerdings die Stimmbänder bei mäßiger Atmung ein wenig, indem sie bei der Einatmung sich etwas voneinander entfernen, bei der Ausatmung sich wieder nähern. Ausgiebig werden diese Bewegungen aber dann, wenn Atemnot oder überhaupt

[1] Er enthält meistens wie alle peripheren motorischen Nerven auch einige sensible (Dorendorf und P. Schultz); beim Menschen soll er rein motorisch sein (Kuttner u. a.).

ein stärkeres Atembedürfnis besteht; dann wird der Eingang zur Lunge bei der Einatmung möglichst erweitert. Wir haben dann 2. die möglichst weite Oeffnung; 3. den möglichst festen und dichten Verschluß des Kehlkopfes und 4. die für uns wichtigste Stellung, diejenige bei der Erzeugung der Stimme, die wir weiter unten des näheren besprechen.

1. Ueber die Ruhestellung der Stimmbänder gibt Figur 14 Aufschluß, so daß hierüber nichts weiter zu sagen ist.

2. Den möglichst weit geöffneten Kehlkopf zeigt uns Figur 17. Man sieht, wie außerordentlich weit die Gießbeckenknorpel durch Zug der Crico-arytaenoidei postici auseinandergehen und wie namentlich ihre vorderen Stimmfortsätze, welche an den Stimmbändern als stumpfe Vorsprünge erscheinen, sich voneinander entfernen, so daß man bei genügender Beleuchtung weit in die Luftröhre, manchmal sogar bis in die Brust hinein sehen kann, wo sich die Luftröhre in ihre beiden Bronchien teilt.

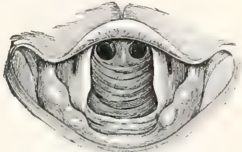


Fig. 17. Spiegelbild des Kehlkopfes mit möglichst weit geöffneter Stimmritze, so daß man die Teilung der Luftröhre in ihre beiden Bronchien sieht. Das Uebrige wie in Figur 14. Nach Landois-Rosemann.

3. Der fest geschlossene Kehlkopf ist physiologisch von großer Bedeutung, da er bei dem sogenannten Pressen oder Drängen, wie wir es bei Entleerung des Kotes, bei starken Anstrengungen, Hebungen schwerer Gewichte usw. anwenden, ganz dicht und fest geschlossen sein muß, damit die kräftig gespannten Bauchmuskeln ein festes Widerlager an dem Zwerchfell finden. Auch nicht eine Spur von Luft entweicht hierbei aus der Luftröhre. Ebenso muß beim Schlingakt der Kehlkopf fest geschlossen sein, damit keine Speisen in die Luftröhre eindringen. Man bekommt eine gute Vorstellung von diesem dichten Verschluß, wenn man verschiedene von den oben beschriebenen Kehlkopfmuskeln so vereinigt denkt, daß sie einen geschlossenen Ring, einen sogenannten Sphincter bilden. Ihre gemeinschaftliche Zusammenziehung verschließt dann den Kehlkopf, wie eine Schnur, die man um eine weiche Röhre legt und fest zuzieht. Figur 18 zeigt schematisch diese Muskeln; die innersten voll gezeichneten Linien 1 stellen die Stimmbandmuskeln dar, welche, wie erwähnt, die Stimmbänder festigen und die vorderen Teile der Gießbeckenknorpel einander nähern. Die äußerste Schleife 3, fein punktiert gezeichnet, ist nach obiger Bezeichnung (s. Fig. 9) der Thyreo-arytaenoideus externus in seinen äußeren Abschnitten, der sich in den Musculus arytaenoideus obliquus fortsetzt und mit dem gleichen Muskel der anderen Seite sich hinten wie ein „Hosenträger" kreuzt. Hierdurch sichert er eine größere Festigkeit des Verschlusses. Die mittlere, grob punktierte Schleife 2 umgibt den Kehlkopfeingang am dichtesten, indem sie von der vorderen Kante des Schildknorpels um die Muskelfortsätze der Gießbeckenknorpel wieder nahezu an ihren alten Ort zurückkehrt. Die betreffenden Zugrichtungen finden sich in dem Thyreo-arytaenoideus externus und in dem Crico-arytaenoideus lateralis. Schließlich sei noch erwähnt, daß auch der eigentliche Oeffner der Stimmritze, der Crico-arytaenoideus posticus den

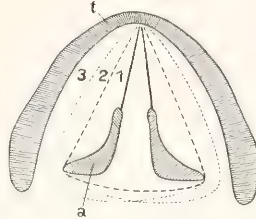


Fig. 18. Die sphinkterartige Wirkung verschiedener Kehlkopfmuskeln. Schematisch. t Cartilago thyreoidea. a Cartil. arytaenoidea. Nach Henle.

Verschluß unterstützen kann, wenn ihm die in dem vorderen Abschnitt der Schleife liegenden Muskelfasern mit der nötigen Kraft entgegenwirken.

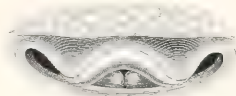


Fig. 19. Der fest geschlossene Kehlkopf mit herabgesenkter Epiglottis. Nach Czermak.

Das Bild des geschlossenen Kehlkopfes sieht man in Figur 19, in welcher auch noch die Epiglottis mit ihrem weichen inneren Polster auf die vorderen Teile der Stimmbänder drückt, wie dies Czermak zuerst beschrieben und neuerdings P. H. Eykman durch sinnreiche momentane Röntgenbeleuchtung bei dem Schlingakt genauer verfolgt hat.

3. Die windgebenden Apparate und das Windrohr. Wie jede Zungenpfeife nur laut tönt, wenn sie in passender Weise angeblasen wird, so muß natürlich auch der Kehlkopf und zwar gewöhnlich von einer Richtung, nämlich von der Lunge her angeblasen werden. Zwar ist es auch möglich, ihn von der entgegengesetzten Richtung

anzublasen oder anzusaugen, und nicht wenige Säugetiere, wie das Pferd, der Esel, viele katzenartigen Raubtiere bringen in ihren typischen „Stimmen“ ex- und inspiratorische Laute hervor. Beim Menschen kommt die inspiratorische Stimme nur ausnahmsweise und meist zufällig vor.

Der mehr oder weniger hohe Druck, unter welchen die Luft in der Luftröhre gesetzt wird, entsteht dadurch, daß das Volumen der in den Lungen und ihren Ausführungswegen, den Bronchien und der Luftröhre, befindlichen Luft verkleinert wird, gerade wie in einem Blasebalg, dessen Luftraum man zusammendrückt. Je nachdem dieser Luftraum klein oder groß ist und der ihn umfassende Balg schnell oder langsam zusammengedrückt wird und eine größere oder kleinere Ausflußöffnung hat, wird sich der Druck mehr oder weniger erhöhen und in verschiedenen, oft kaum nachweisbaren Grenzen schwanken, ganz ähnlich wie der Luftdruck in der Luftröhre. Hat doch auch der bisher meines Erachtens noch immer unerreicht dastehende Meister in der Erforschung und Nachbildung der menschlichen Sprachlaute Wolfgang v. Kempelen für seine Sprechmaschine einen Blasebalg angewendet.

Die Größe des zur Stimmerzeugung nötigen Luftdruckes schwankt je nach der Lautheit und Höhe der menschlichen Stimme innerhalb weiter Grenzen. Cagniard-Latour, sowie ich und neuerdings Roudet hatten Gelegenheit, an sonst gesunden erwachsenen Personen, welche Luftröhrenfisteln trugen, diesen Druck zu messen. Ein mit Quecksilber oder gefärbtem Wasser gefülltes Manometerrohr, welches mit der luftdicht eingesetzten Trachealkanüle durch ein T-Rohr verbunden war, zeigte bei Verschluß des einen Schenkels von diesem T-Rohr den Luftdruck in der Luftröhre an. Bei Oeffnung dieses Schenkels atmete die Versuchsperson ziemlich frei durch die Kanüle. Es ergab sich, daß ein mittlerer Ton in mäßiger Stärke gesungen, einen Druck von im Mittel 155 mm Wasser, ein um eine Quart höherer etwa 190, ein um eine Terz tieferer 140 mm Wasser gebrauchte. Der mittlere Ton lauter gesungen erforderte 210 mm. Auch die verschiedenen Vokale, in möglichst gleicher Stärke und mittlerer Stimmlage gesprochen, verlangten verschiedenen Druck; das A etwa 125, das E 212, das I 220, das O 198 und das U 200 mm Wasser. Je größer der Widerstand bei engem Ansatzrohr ist (wie bei I und bei U), um so höher ist der Luftdruck. Beim A, das mit weiter Mundöffnung erzeugt wird, ist er am kleinsten.

Die Arbeit, welche hiernach ein Sänger oder Redner durch seinen Gesang oder seine Rede leistet, ist sehr verschieden. Man hat versucht, sie in Meterkilogramm anzugeben, eine schwierige Sache, an deren Untersuchung sich unter anderen F. Auerbach, Zwaardemaker, Gutzmann, Rousselot u. A. beteiligten. Namentlich konstruierte Zwaardemaker eine Reihe sinnreicher Apparate, vermittels deren er die Stärke der durch die Lippen oder Nase erfolgenden Luftströmung messen und aufschreiben konnte. Diese objektive Energie muß aber scharf geschieden werden von der subjektiven Schallstärke, weil beide nicht zusammenfallen. Ohne hier auf Einzelheiten einzugehen und Zahlen anzugeben, sei nur bemerkt, daß unter sonst gleichen Verhältnissen die Menge der in bestimmter Zeit ausgeatmeten Luft ein ungefähres (relatives) Maß für die geleistete Arbeit ist (Gutzmann). Die Sprecharbeit leisten wesentlich die Bauchmuskeln, welche den Brustkorb verkleinern. Diese Tätigkeit muß bei der Erzeugung der Stimme und namentlich der Sprache stets eine genau abgemessene sein. Haben wir aus irgendeinem Grunde Atemnot, z. B. nach schnellem Lauf, so sorgt unser Organismus zu allererst für die Erfüllung dieser lebenswichtigen Tätigkeit und die kurzen Sätze der Sprache werden immer durch Atembewegungen unterbrochen. Krankhafterweise findet ähnliches beim Stottern statt.

Diese Sprechatmung ist bisher noch verhältnismäßig wenig untersucht worden. Gutzmann hat das Verdienst, auf die Wichtigkeit dieses Vorganges aufmerksam gemacht und sie näher studiert zu haben.

Jeder, der sich selbst beobachtet, wird wissen, was schon Meister Kempelen beschreibt, daß man beim Sprechen ganz anders atmet, als in der Ruhe. Man atmet bei offenem Munde und sehr weiter Stimmritze (Gutzmann) möglichst schnell und geräuschlos ein, füllt die Lungen schnell mit Luft und läßt diese Luft, indem man den Brustkorb langsam verkleinert, nicht selten mit kleinen Ruhepausen unter Druck durch den tönenden Kehlkopf treten. Einen sehr guten Einblick in diese Verhältnisse liefern Kurven, welche die Vorgänge aufzeichnen. Wenn man sich einen Apparat ähnlich einem Gasometer einer Gasanstalt, natürlich nur viel kleiner, vorstellt, in welchen Gas langsam oder schnell einströmt und dabei die äquilibrierte Glocke des Gasometers langsam oder schnell in die Höhe hebt, so zeigt die Größe und die Art dieser Erhebung, welche man auf eine bewegte Platte aufzeichnet, die in der Zeiteinheit ein- und ausgeatmete Luftmenge an. Folgende Kurve von Boruttau (s. Fig. 20) erläutert die Verhältnisse. Zuerst wird einfach ein- und ausgeatmet und jedesmal in der auf der unteren Horizontalen angegebenen Zeit etwa 500 ccm, dann nach 10 Sekunden atmet man in einem Zuge etwa 2000 ccm ein und weiter alle Luft, etwa 3500 ccm wieder aus, um schließlich bei mittlerer Bruststellung wieder die gewöhnliche Atmung zu beginnen. Würde man die tiefe Einatmung von 500 auf 4000 ccm zum Sprechen benützen, so ginge der absteigende Schenkel ganz langsam, infolge der Sprachbewegung ein wenig erzitternd, herunter.

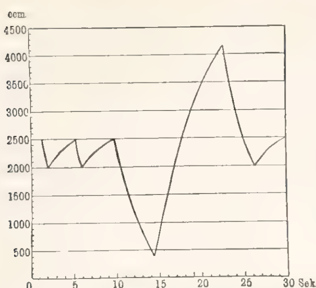


Fig. 20. Atemvolumkurve von links nach rechts zu lesen. Die aufsteigenden Linien zeigen die Ausatmungs-, die absteigenden die Einatmungsbewegungen an; ihre Höhe (siehe die linke Senkrechte) die ein- oder ausgeatmeten Luftmengen; die Zeit ist auf der Horizontalen vermerkt. Nach Boruttau in Nagels Handbuch der Physiologie.

4. Das Ansatzrohr. Unter Ansatzrohr verstehen wir streng genommen alle die über den Stimmbändern gelegenen, miteinander zusammenhängenden Hohlräume. Seine überaus komplizierte Gestalt, wenn man namentlich noch die Höhlen der Nase und der Gesichtsknochen hinzurechnet, ist sehr schwer zu beschreiben. Das Folgende dürfte genügen. Ueber den wahren Stimmbändern finden sich die falschen und weiterhin in der Mitte des ganzen Hohlraumes der Kehldeckel, der je nachdem er aufgerichtet oder auf die Stimmbänder niedergebeugt ist, die Resonanz und den Gang der Schallstrahlen beeinflußt. Zwischen den wahren und falschen Stimmbändern bauchen sich (s. Fig. 9 S. 635) die Morgagnischen Ventrikel aus, die nicht mit Unrecht mit dem Mundstück der Trompete verglichen werden, in welches hinein die Lippen des Bläsers frei schwingen können. Bei manchen Tieren, wie den Brüllaffen, wandeln sie sich zu großen resonatorischen Höhlen um, welche die Stimme verstärken. In den Ventrikeln des menschlichen Kehlkopfes finden sich viele kleine Drüsen, die ihr schleimiges und wässeriges Sekret über die wahren Stimmbänder, die übrigens selbst daran reich sind, ergießen und diese stets feucht halten. Die falschen Stimmbänder sind nicht frei von Muskeln und können sogar unter pathologischen Verhältnissen die wahren Stimmbänder einigermaßen vertreten.

Oberhalb des Kehlkopfes liegt dann, wenn man die Sache schematisieren will, eine senkrechte Röhre, die nach vorn in zwei übereinander gelegene, durch eine horizontale Scheidewand getrennte Hohlräume übergeht. Die senkrechte Röhre ist der sogenannte Rachen (R), der nach vorn in die Mundhöhle (M) und etwas höher in die Nasenhöhle (N) sich fortsetzt (s. die schematische Figur 21). Eine bewegliche Klappe, das Gaumensegel (G), ermöglicht, die Mundhöhle von der Nasenhöhle abzuschließen, so daß die Luft aus dem Kehlkopf nur durch den Mund entweichen bezw. bei tönendem Kehlkopf nur die Luft in der Mundhöhle erschüttert werden kann. Ist die Klappe offen (punktiert gezeichnet), dann kann auch Luft durch die Nase entweichen, bezw. beim Ertönen der Stimme ihre Hohlräume erschüttern. Die Größe der Mundhöhle, sowie die Spannung ihrer Wände unterliegt mannigfachen Schwankungen. Liegt die Zunge am Gaumen und sind die Lippen geschlossen, so ist sozusagen gar keine Mundhöhle vorhanden; wird der Mund dagegen weit geöffnet, so kann sie außerordentlich groß werden und dann je nach der Oeffnung des Mundes zwischen diesen beiden Größen hin und her schwanken. Da des weiteren in der Mundhöhle ein muskulöser Klumpen, die Zunge, liegt, welche sich als Ganzes, und weil selbst aus Muskeln bestehend, in ihrer Gestalt und Festigkeit auf die mannigfachste Weise verändern kann, so ist es klar, daß die Mundhöhle alle erdenklichen Gestalten annehmen kann, von der wir bei der Physiologie der Sprache Näheres hören werden. Hierzu kommt, daß, wie schon angedeutet, die obere harte Begrenzung der Mundhöhle, der knöcherne Gaumen, nach hinten zu in eine muskulöse Platte, den weichen Gaumen, übergeht, der nach links und rechts abwärts in zwei muskulösen Bogen endigt und in seiner Mitte das Zäpfchen trägt. Dieser weiche Gaumen kann ähnlich wie die Zunge seine Lage und seine Festigkeit in hohem Maße verändern und hierdurch die Verbindung zwischen Mund- und Nasenhöhle regulieren. Legt er sich fest an die hintere Rachenwand an, so sind die Nasenhöhlen

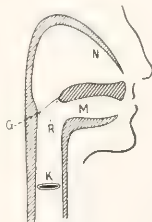


Fig. 21. Schematischer Durchschnitt des Ansatzrohres. N Nasenhöhle, G Gaumensegel, R Rachen-, M Mundhöhle, K Kehlkopf.

von der Mundhöhle abgesperrt. Figur 22 zeigt den Querschnitt durch einen Schädel, in welchem das Gaumensegel schlaff herabhängt und Mund- und Nasenhöhle weit miteinander verbunden sind. In Figur 23 stemmt sich das gefestigte Gaumensegel gegen die hintere Rachenwand fest an und bildet einen dichten Verschluß von unten nach oben, da es sich gegen einen in der hinteren Rachenwand vorspringenden Wulst, den sogenannten Wulst von Passavaut, von unten her anlehnen kann.

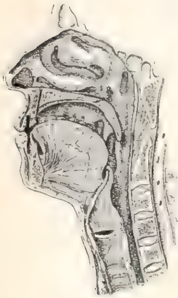


Fig. 22.



Fig. 23.

Fig. 22. Das Gaumensegel hängt schlaff herab. Mund- und Nasenraum bilden ein Ganzes.

Fig. 23. Das gehobene Gaumensegel sperrt den Mund- von dem Nasenraum ab.

Die physiologische Bedeutung des Ansatzrohres, das die verschiedenartigsten Gestalten annehmen kann, liegt darin, daß es die Klangfarbe unserer Stimme in weiten Grenzen zu verändern vermag, aber nicht, oder nur unter ganz besonderen Bedingungen (Spieß, Gutzmann, Bukofzer u. a.) und in ganz geringem Maße ihre Höhe. Dies steht im Gegensatz zu der Beeinflussung anderer akustischer Zungen, deren Eigenton in seiner Höhe geradezu durch das Ansatzrohr bestimmt wird (vgl. oben Fig. 5). Wie sehr aber das Ansatzrohr in seiner Gesamtheit dem Klange des Kehlkopfes seine charakteristische Färbung gibt, das geht schon aus den Versuchen von Joh. Müller hervor. Denn er fand, daß der frei angeblasene menschliche Kehlkopf wie eine beliebige membranöse Zungenpfeife tönt, während der in situ befindliche, unter gleichen Bedingungen geradezu menschenähnliche Töne hervorbringt. Neuerdings hat man in sinnreicher Weise einen dem Müllerschen ganz ähnlichen Versuch am Lebenden gemacht, indem man auf hier nicht näher zu schildernde Weise eine Röhre auf den tönenden Kehlkopf setzte und so das Ansatzrohr ausschloß. Der so erhaltene reine Kehlkopfton hatte keinen Vokalcharakter (Katzenstein), ebenso wenig einer, der von einer ausgiebigen Verletzung des freiliegenden Kehlkopfes herrührte (Brünings).

Je nachdem eine oder beide Hohlräume (N oder M Fig. 20) in Mitschwingungen versetzt werden, nimmt die Stimme einen verschiedenen Charakter an (dumpfe Stimme, Nasenstimme, näselnde Stimme usw.). Anderweitige Aenderungen des Stimmklanges, wie eine rauhe, belegte Stimme u. dgl. haben ihre Ursache im Kehlkopf selbst, wie in Entzündung, Schwellung, Lähmung der Stimmbänder u. dgl.

5. **Die Stimmbildung.** Daß der Kehlkopf bei dem Menschen (bei den Vögeln ist es bekanntlich anders) der Sitz der Stimme ist, war schon den Alten (Hippokrates) bekannt, denn Oeffnung der Luftröhre unterhalb des Kehlkopfes wie bei Verletzungen, wodurch sein Anblasen verhindert wird, macht die Stimmbildung unmöglich.

Wie im einzelnen die Stimme zustande kommt, darüber suchte man sich (vor der Erfindung des Kehlkopfspiegels) durch Versuche am toten, herausgeschnittenen Kehlkopf zu unterrichten. Abgesehen von früheren Versuchen von Ferrein, Liskovius u. a. war es vornehmlich der berühmte Physiologe und Anatom Johannes Müller, der an herausgeschnittenen menschlichen Kehlköpfen folgende wichtigen Tatsachen feststellte. Nachdem der Kehlkopf durch Vereinigung der hinteren Abschnitte der Stimmbänder (die Gießbeckenknorpel wurden fest miteinander vernäht), sowie durch zweckmäßige Befestigung an einem hölzernen Gestell, Einfügung eines Manometerrohres und eines Anblaserohres in die Luftröhre und schließlich durch Befestigung einer Schnur in der Nähe des Adamsapfels dicht oberhalb des vorderen Ansatzes der Stimmbänder hergerichtet war, wurde er durch Blasen in die Luftröhre zum Tönen gebracht. Die so erzeugten Klänge, welche kaum denjenigen einer menschlichen Stimme gleichen (s. oben), fallen nun an Höhe und Stärke verschieden aus, je nachdem man stark oder schwach in die Luftröhre bläst (die Stärke des Luftdruckes mißt das Manometer) oder die Stimmbänder mehr oder weniger anspannt. Die an dem Kehlkopf befestigte Schnur führte nämlich über eine feste Rolle und trug an ihrem freien Ende eine Schale mit Gewichten, welche den Stimmbändern verschiedene Spannungen erteilten. Blies man daher, z. B. bei gleich bleibender Spannung der Stimmbänder, aber verschiedenem Luftdruck, in den Kehlkopf, so konnte man durch stärkeren Luftdruck den Ton bedeutend in die Höhe treiben, durch Nachlassen desselben aber erniedrigen. Des weiteren suchte Müller sich Klarheit zu verschaffen über das Zustandekommen der verschiedenen Klang-

farben der so erzeugten Klänge, über die sogenannten Register, denen wir später noch unsere Aufmerksamkeit zuwenden werden. Das Wesentliche seiner sich an Angaben von Lehfeldt anlehnenden Ergebnisse ist, daß bei den vollen Klängen der Stimme, welche dem Brustregister entsprechen dürften, die gegeneinander gepreßten und gespannten Stimmbänder als Ganzes schwingen, während bei den höheren, dünneren Stimmklängen, die wir als Fistelstimme bezeichnen können, die durch Spannung verdünnten Stimmbänder wesentlich nur an ihren inneren Rändern schwingen. Neuerdings hat man sogar den Kehlkopf eines lebenden Tieres künstlich angeblasen und durch Reizung der Kehlkopfsmuskeln verschiedenartige Klänge erzeugt (R. Du Bois-Reymond und Katzenstein).

Aber abgesehen von allen diesen seltenen Fällen, in denen der Keklkopf bei Tier und Mensch durch Verwundung bloßgelegt und dem Auge unmittelbar zugänglich war, lehrte das Wesentliche über die Tätigkeit des Kehlkopfes seine Beobachtung mit dem Kehlkopfspiegel.

Betrachtet man nämlich einen tönenden menschlichen Kehlkopf mit dem Kehlkopfspiegel, so sind in erster Linie die Stimmbänder einander genähert und die Stimmritze hat eine lange, schmale, lanzettförmige Gestalt mit ein wenig verwaschenen Rändern; letzteres infolge der schnellen Bewegungen der Stimmbänder, die gleich einer schwingenden Saite die ganze Breite ihres Weges sichtbar sind. Es ist nun das Verdienst von Oertel, eine in der Physik schon längst bekannte Untersuchungsmethode auf den tönenden Kehlkopf angewendet zu haben, welche, genau ausgeführt, den tönenden Kehlkopf sozusagen in jeder Phase seiner Schwingung still zu stellen und ihn so zu beobachten gestattet. Diese überaus geistvolle und schöne Methode ist die der intermittierenden Beleuchtung.

Denken wir uns, ein Kehlkopf erzeuge ganz genau eine Zeit lang einen Ton von 100 Schwingungen in der Sekunde, so werden seine Stimmbänder jedesmal nach $^1/_{100}$ Sekunde eine ganz bestimmte Stellung einnehmen, z. B. sich maximal einander genähert oder maximal von einander entfernt oder eine beliebige Mittelstellung eingenommen haben. Beleuchten wir nun diesen Kehlkopf mit einer intermittierenden Lichtquelle, die alle $^1/_{100}$ Sekunden auf einen ganz kurzen Augenblick, sagen wir $^1/_{1000}$ Sekunde aufleuchtet, so sehen wir die tönenden Stimmbänder in einer dieser Stellungen stillstehen. Sie rühren sich auch nicht eine Spur; denn sie werden ja immer nur in einer ganz bestimmten Stellung einen Augenblick beleuchtet. Läßt man, was ich noch mit ein paar Worten erwähnen möchte, die Lichtblitze einander etwas schneller als 100mal, z. B. 101 mal hintereinander in der Sekunde folgen, so tritt (was man sich am einfachsten an einer Wunderscheibe mit n Spalten und n + 1 oder n — 1 Bildern klar macht), eine scheinbar verlangsamte Bewegung der Stimmbänder nach rückwärts; bei langsamerer Folge der Lichtblitze dagegen eine verlangsamte Bewegung der Stimmbänder nach vorwärts (in ihrer natürlichen Bewegung) ein.

Oertel führte seine Untersuchungen in intermittierendem Licht so aus, daß er eine an ihrer Peripherie mit gleich abständigen Löchern versehene Scheibe durch einen Schnurlauf in schnelle Drehung versetzte, erst mit der Hand, später elektrisch, und durch die Löcher den tönenden Kehlkopf beobachtete. Sang der beobachtete Sänger z. B. einen Ton von 100 Schwingungen in der Sekunde und bewegten sich gerade so viel Löcher in der Sekunde beim Auge des Beobachters vorbei, so schienen die Stimmbänder stillzustehen, änderte sich dagegen die Höhe der Stimme auch nur um eine Spur, sei es nach oben oder nach unten, so bewegten sich die Stimmbänder — bei gleichbleibender Drehungsgeschwindigkeit der Scheibe — langsam auf und nieder, ein äußerst wunderbarer Anblick.

In neuerer Zeit hat man nun mit dieser stroboskopischen Methode lehrreiche Versuche gemacht, über die folgendes mitgeteilt sei.

Oertel beschrieb zunächst, daß wenn man einen Kehlkopf, der in Fistelstimme ertönt, stroboskopisch beobachtet, die Stimmbänder sich nicht im ganzen gleichsinnig auf und ab bewegen (s. Fig. 24a), sondern daß ihre inneren Teile sich in anderem Sinne bewegen, wie ihre äußeren. Diese werden vielmehr von verhältnismäßig ruhig stehenden Teilen getrennt, ähnlich einer schwingenden elastischen Metallplatte, bei welcher der auf sie gestreute Sand auf den ruhenden Stellen in Form der bekannten Chladnischen Klangfiguren liegen bleibt. Denken wir uns die Stimmbänder als flache Platten, so würden ihre Querschnitte in schwingendem Zustande folgendermaßen aussehen; nämlich wenn sie als Ganzes hin- und herschwingen, wie in Figur 24a, und wenn ihre inneren Partien in anderem Sinne schwingen als ihre äußeren, wie in Figur 24b. Bei r und r_1 bildet sich eine von vorn nach hinten verlaufende verhältnismäßig ruhig stehende Linie, in welcher man ähnlich wie bei den Chladnischen Klangfiguren Sand, hier gelegentlich etwas Flüssigkeit oder Schleimtröpfchen liegen sieht.

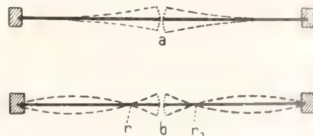


Fig. 24. Elastische Platten oder Stäbe im Querschnitt, bei a als Ganzes, bei b in Teilen schwingend; r und r_1 ruhende Abschnitte.

Dieser bestimmten Angabe von Oertel ist aber von anderer Seite (Réthi, Nagel u. a.) entgegengehalten worden, daß man diese Schwingungen lateral von r nicht beobachten könne; höchstens gab man zu, daß „die Schwingungen nur in einer ziemlich scharf abgegrenzten Randzone kräftig sind und die übrige Stimmlippe fast still steht". Ich meine, das ist genügend und steht kaum im Widerspruch mit den früheren Angaben von Liskovius, Johannes Müller und Oertel. Bei einer schwingenden Platte sieht man ja auch nicht die geringste Bewegung.

Wie aber bewegen sich des genaueren die Stimmbänder bei der Stimmbildung? Wenn man früher vielleicht in allzu naher Anlehnung an metallische oder membranöse Zungenpfeifen eine Schwingungsart der Stimmbänder annahm, welche der in Figur 24a gleichkommt, so ist eine derartige Annahme namentlich für die Bruststimme entschieden zu weitgehend und falsch. Musehold konnte zeigen, daß man bei stroboskopischer Aufnahme der Bruststimme verhältnismäßig leicht die Verschlußstellung der Stimmbänder erhält, so wie sie Figur 25

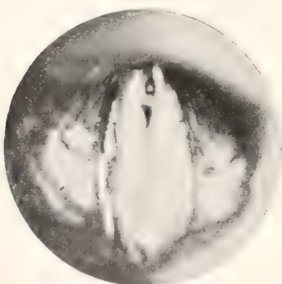


Fig. 25. c' forte, Bariton. Brustregister (stroboskopisch).

von Nagel vergrößert zeigt, ein Hinweis darauf, daß diese Stellung ziemlich lange dauert, während im Falsett sich die Stimmritze nicht völlig schließt. Es handelt sich also, wie ich hinzufüge, im ersten Falle um kurzdauernde, intermittierende Luftstöße, ähnlich denen gewisser aufschlagender Zungenpfeifen (s. Fig. 4 und 5 S. 632), im zweiten um mehr remittierende Erschütterungen, ähnlich denen durchschlagender Zungenpfeifen, bei denen ein völlig luftdichter Abschluß (vgl. Fig. 1a S. 630) in keiner Stellung der Zunge stattfindet.

Zum Verständnis des dichten Verschlusses der Stimmbänder bei der Erzeugung der Bruststimme sei auf eine Tatsache hingewiesen, die bisher so gut wie gar nicht beachtet wurde, das ist der Umstand, daß jedes Stimmband über die Mittellinie hinaus, wenn es auf keinen nennenswerten Widerstand stößt, sich auf die andere Seite bewegen kann (vgl. S. 637), wodurch natürlich ein viel festerer Verschluß erzielt wird, als wenn die Stimmbänder bloß infolge ihrer Längsspannung die Stimmritze schlössen (Réthi, Neumayer). Daß dieser seitliche Druck von links nach rechts und von rechts nach links außerordentlich viel zur Festigung des Verschlusses beim Pressen und Drängen usw. beiträgt, scheint mir selbstverständlich. Ich glaube aber auch, daß er bei der Erzeugung der Bruststimme seine wichtige Rolle spielt, daß also, anders ausgedrückt, in dieser Beziehung, aber nur in dieser Beziehung allein, der Kehlkopf einer Ewaldschen Zungenpfeife (vgl. Fig. 3 S. 631) gleicht; denn eine verschiedene Längsspannung, die in den tönenden Stimmbändern stets vorhanden ist, fehlt ja natürlich vollständig in einer Polsterpfeife. Ich glaube also, wie schon vor längerer Zeit Merkel, neuerdings Musehold u. a. ausführten, daß im Brustregister die Stimmlippen (und hier handelt es sich dann tatsächlich um voluminöse Stimmlippen, gleich den Mundlippen eines blasenden Trompeters, und nicht um platte Stimmbänder), sich sowohl nach der Mitte und unten, wie nach oben und außen zu bewegen. Es sind sicher gegenschlagende Zungenpfeifen, die von ihren breiten Berührungsflächen aus nach oben auseinanderschwingen, wie auch ganz kürzlich Musehold durch sorgfältige Untersuchungen ausgeführt und durch schöne Photographien belegt hat. Im Falsettregister dagegen, in welchem sich wesentlich die dünnen, stark gespannten Innenränder der Stimmbänder bewegen, dürfte die seitliche mit entsprechendem Gegendruck der Stimmbänder verbundene Bewegung nicht oder kaum, vielleicht im Uebergang von der Brust- zur Falsettstimme (Mittelregister), vorhanden sein. Man sieht deshalb die Stimmritze auch stets mehr oder weniger geöffnet (s. Fig. 26.) Hier sind die dünnen, mehr bandartigen Stimmlippen durchschlagende Zungen, an denen man auch gelegentlich Einzelheiten, wie Gefäße erkennen kann, weil die Stimmbänder in ihren seitlichen Partien sich nicht oder kaum nach den Seiten bewegen. Auch Schleim liegt oft auf diesen verhältnismäßig ruhigen Teilen der Stimmbänder. Die wunderliche Behauptung, daß die Stimmbänder im Falsett Pfeiftöne erzeugen, wie wir etwa mit den Lippen und nicht als akustische Zungen wirken, ist von der Hand zu weisen. Musehold gibt die Gestalt und die Bewegung der Stimmbänder im Falsett folgendermaßen an. In Figur 25a A sind die Stimmbänder

möglichst genähert, in B möglichst weit voneinander entfernt. Beachtenswert scheint mir in beiden Fällen, d. h. bei der Brust- und der Falsettstimme die keilförmige Zuspitzung des unter den Stimmbändern liegenden Kehlkopfraumes, der offenbar für das sichere Ansprechen der Stimmbänder von der allergrößten Wichtigkeit ist.

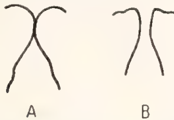


Fig. 25a. Stimmbänder- im Frontalschnitt bei der Brustsstimme. A bei festem, breitem Verschluß, B in größter, kurz dauernder Entfernung voneinander. Die ganzen Massen der Stimmbänder schwingen nach außen und oben. Nach Musehold.

6. Die Eigenschaften der menschlichen Stimme. 6a) Der verschiedene Klang der menschlichen Stimme. Die Stimmregister. Sehe ich von der induviduellen Färbung einer jeden menschlichen Stimme ab, die uns ihren Erzeuger fast immer so sicher erkennen läßt, als ob wir ihn leibhaftig vor uns sähen, so weist die Stimme eines jeden Menschen zwei verschiedene Stimmarten auf, deren wir schon mehrfach Erwähnung gethan haben, nämlich die Bruststimme und die Falsettstimme, auch Kopfstimme genannt.

Auf Grund älterer und neuerer Untersuchungen dürfte hierüber folgendes sicher sein. Der Name Bruststimme rührt daher, weil die Stimme aus der Brust zu kommen scheint, indem der elastische Brustkorb lebhaft mitschwingt, was auch gut zu fühlen ist, (fremitus pectoralis) und die im Kehlkopf erzeugte Stimme gewaltig verstärkt, ähnlich wie eine schwingende Saite laut tönt über einem passenden Resonanzkasten (Klavier), dagegen kaum gehört wird, wenn man sie über einer steinernen Wand aufspannt. Auch der Brustkorb muß elastisch sein, wenn er mittönen soll; diese Elastizität gewinnt er vornehmlich dadurch, daß er ausgedehnt wird. Sobald wir deshalb sprechen, namentlich laut sprechen oder singen wollen, atmen wir tief ein. Meistens wird auch der Kopf gehoben, dadurch die Luftröhre gespannt und in ihrer Resonanz erhöht. Dann wird der Kehlkopf als Ganzes festgestellt (denn ein schlotternder Stimmapparat wäre nicht zu gebrauchen). Die gespannten Stimmlippen fliegen gegeneinander, berühren sich fest in der Mitte und ein entsprechender Druck in der Luftröhre bringt sie zum Schwingen. Stoßweise wie der gebrauchte Dampf einer Lokomotive aus dem Schornstein, so puffen, freilich in unendlich viel schnellerer Reihenfolge, die Luftstöße aus den immer nur auf kurze Zeit geöffneten Stimmlippen ins Freie und so entsteht der volle und kräftige Klang der Bruststimme, der deshalb reich an Obertönen ist (s. S. 6 und Fig. 25, 25a und 26c, Br).

Bei der Fistelstimme dagegen, wie schon erwähnt, kommt es nicht zu jenen festen Verschlüssen und starken, voneinander getrennten Luftstößen. Vielmehr sind die Stimm-

a



Fig. 26a. c′ forte, Bariton. Falsettregister (stroboskopisch).

b

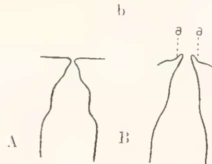


Fig. 26b. Stimmbänder in Frontalschnitt beim Falsett, A einander möglichst genähert, B möglichst weit voneinander entfernt. Es schwingen wesentlich nur die inneren, etwa bis a reichenden Teile der Stimmbänder. Nach Musehold.

c

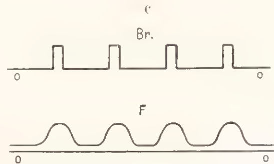


Fig. 26c. Br die intermittierenden Lufterschütterungen bei Erzeugung der Bruststimme; F die remittierenden bei Erzeugung der Falsettstimme. Im ersten Falle (Br) entweicht viel weniger Luft als im zweiten (F). Schematisch.

bänder stark von vorn nach hinten gespannt und offenbar infolge des aktiv geringer gespannten und deshalb gedehnten Vocalis (Merkel, Jörgen Möller und Fischer) dünner, bei entsprechender Beleuchtung (Czermak, Störk) auch durchscheinender. Es bewegen sich daher wesentlich die inneren, dünneren Ränder der Stimmbänder (Lehfeld, Réthi), die keine so festen Verschlüsse, ja nach Musehold überhaupt keine Verschlüsse erzeugen können (s. Fig. 26a, 26b und 26c, F). Die einzelnen Luftstöße sind nicht intermittierend, sondern nur remittierend, die Stimme infolge der starken Längsspannung der Stimmbänder an und für sich höher, nicht so kräftig und voll, und ärmer an Obertönen. Die Brustresonanz ist schwach, die Kopfresonanz dagegen, welche bei der Bruststimme verhältnismäßig zurücktrat, deutlich bemerkbar. Die Stimme scheint mehr aus dem Kopf zu kommen und führt daher auch vielfach den Namen Kopfstimme. Infolge des mehr remittierenden Abschlusses der Luft kann man, wie schon Meister Garcia beschreibt, unter sonst gleichen Umständen denselben Ton in Bruststimme länger aushalten, als in Falsettstimme.

Je mehr es der Sänger versteht, die beiden genannten Mechanismen, den der Brust- und den der Falsettstimme einander ähnlich zu machen und gewissermaßen ineinander überzuführen, um so ähnlicher werden auch in ihrem Klange die beiden Register (Zwischenstimme, voix mixte [Fournié]). Wie das im einzelnen geschieht — denn der Sänger selbst weiß es natürlich nicht —, darüber sind die Akten noch nicht geschlossen. Ueber andere Register (Strohbaßregister u. a.) sind die ausführlichen Werke einzusehen.

Schließlich noch ein paar Worte über den Einsatz der Stimme, der wohl mehr für die Sing- als für die Sprechstimme wichtig ist. In der Regel, weil offenbar am leichtesten, vollzieht sich der Stimmeinsatz in der Weise, daß der zuerst fest gebildete Verschluß der Stimmbänder gesprengt wird und erst dann die regelmäßigen Schwingungen der Stimmbänder, also der Stimmton einsetzt. Man hört deshalb kurz vor der Stimme, lauter oder schwächer, einen kurzen Knack oder wie man das Geräusch sonst nennen will, der auch in manchen Sprachen als besonderer Laut auftritt und ein besonderes Schriftzeichen besitzt (s. unten S. 665). Viel schwieriger ist es, den Luftdruck in der Luftröhre und die Spannung der Kehlkopfmuskeln so zu bemessen, daß gleich die erste Explosion der Stimmbänder, die dann viel schwächer erfolgen muß, zur Bildung der Stimme verwendet wird, wie das meistens beim Gesang stattfindet. Endlich kann es sich auch ereignen, daß die Stimmbänder gewissermaßen zu träge sind und die Luft aus der Luftröhre schon entweicht, ehe sie sich zum Tönen geschlossen oder ausreichend genähert haben. Dann geht der Stimme ein mehr oder weniger langes Geräusch voraus, welches das H unserer Sprache oder ein ihm ähnlicher Laut ist. In neuerer Zeit ist diese Frage des Stimmeinsatzes und der Haltung der Stimmorgane, des Stimmansatzes von verschiedenen Forschern (Gutzmann, Barth, Hellat, Spieß, Bukofzer, Flatau) namentlich in bezug auf den Gesang des genaueren studiert worden. Hierbei hat man vielfach dem tiefen Stand des Kehlkopfes auch bei Bildung von hohen Tönen eine besondere Bedeutung zugeschrieben.

Aehnliches gilt auch von dem Auslauten der Stimme. Wenn man z. B. das Wort ja spricht, so kann man das A allmählich aufhören lassen, wie es in der ruhigen Sprache geschieht, was nebenbei bemerkt, meistens eine geringe Senkung des Tones zur Folge hat. Wir können das A aber auch durch einen plötzlichen Schluß der Stimmritze abbrechen, wie das gelegentlich in heftiger Rede geschieht, wobei der Stimmton etwas in die Höhe steigt. —

Was den Klangunterschied der Sprechstimme und der Singstimme betrifft, auf den schon Helmholtz und Donders hingewiesen haben und durch verschiedenen Mechanismus der Stimmbildung erklären wollten, so sei bemerkt, daß grundsätzlich in der Bildung dieser beiden Stimmarten wohl kaum Unterschiede vorhanden sind, wenn auch die Sprechstimme meistens schärfer und die Singstimme weicher oder tönender ist. Zudem verlangt man beim Gesang als Regel, daß die Töne in ihrer bestimmten Höhe längere oder kürzere Zeit ausgehalten werden und daß man sprungweise zu anderen Tonhöhen übergeht, während gerade in der Sprache das entgegengesetzte stattfindet. Die an und für sich viel kürzer dauernden Stimmlaute der Sprache — denn man spricht viel schneller, als man singt — schwanken in ihren Grundtönen, (wie wir später sehen werden), fortwährend und recht bedeutend auf und nieder, was der deutlichen Bildung und damit dem Verständnis der Vokale zugute kommt, während eine gleichmäßige Haltung einer lauten Stimme das Verständnis der Vokale schädigt und erschwert.

6b) Die Höhe der menschlichen Stimme. Die Höhe der menschlichen Stimme und der dem Menschen nahestehenden Geschöpfe ist zunächst verschieden je nach der Größe des Kehlkopfes. Je größer derselbe, um so tiefer, und je kleiner er ist, um so höher ist sie. Die Stimme des Kindes, der Frau und des Mannes, sowie etwa diejenige eines Rindes, eines Hundes, eines Kaninchens oder einer Maus sind dafür Belege. Aber auch das einzelne Individuum, vornehmlich der Mensch, kann seine Stimme in verschiedener Höhe erklingen lassen.

Wollen wir tiefe Töne erzeugen, so senken wir in der Regel den Kehlkopf, wodurch aller Wahrscheinlichkeit nach die Stimmbänder ein wenig entspannt werden; wollen wir in die Höhe singen, so wird auch der Kehlkopf gehoben und dadurch schon die Stimmbänder gespannt. Freilich wird von einigen Gesanglehrern neuerdings auch für

hohe Töne der Tiefstand des Kehlkopfes empfohlen, weil so der Schall freier nach außen treten könne (Barth u. a.).

Während die Sprechstimme nach Beobachtungen von Gutzmann sich etwa in einer Quart bewegt, umfaßt die Gesangstimme des Erwachsenen durchschnittlich 2 Oktaven. Nach Joh. Müller — die Angaben anderer weichen nach oben oder nach unten ein wenig ab — umfassen die verschiedenen menschlichen Stimmen folgende Töne

		oder in Schwingungszahlen:
Baß:	E—f^1	80—341
Tenor:	c—c^2	128—512
Alt:	f—f^2	170—683
Sopran:	c^1—c^3	256—1024

Das Stimmgabel-a der sogenannte Kammerton — 435 Schwingungen.

Hiernach sind die Töne c′ bis f′ allen Stimmen gemeinsam. Nur ausnahmsweise werden tiefere Töne, wie F mit 42 Schwingungen oder g^3 mit 1536 Schwingungen erreicht. Diese Breite der Stimme wird erst allmählich erworben. Die Stimme der Neugeborenen bewegt sich nach Flatau und Gutzmann nur in den Grenzen einer Sekunde von a′ bis h′, diejenigen von etwa sechsjährigen Kindern nach Vierordt, Paulsen u. a. etwa um eine Oktave. Mit der Mannbarkeit wächst der männliche Kehlkopf bedeutend (Vortreten des Adamsapfels, Stimmbruch), der weibliche ebenfalls, aber lange nicht in dem Maße.

Der Mittel, deren wir uns bedienen, um hohe oder tiefe Töne zu erzeugen, gibt es mannigfache. 1. Aehnlich wie bei einer Saite steigt die Stimme mit der Spannung der Stimmbänder, wobei sie aber zugleich verlängert werden. Dies konnte Merkel an sich selbst feststellen; denn seine Stimmbänder maßen bei mittleren Tönen 6½, bei hohen Brusttönen 7½ bis 7¾ und bei tiefen Brustönen 5 Linien, wobei zugleich die hinteren Partien der Stimmritze etwas geöffnet waren, was bei der Bildung hoher Töne nie vorkam (vgl. auch F. Semon). Sie können aber auch zweitens verschieden stark gespannt werden, ohne daß sie ihre Länge verändern, gleich der Saite einer Violine, die gestimmt wird, worauf wesentlich Vierordt zuerst hingewiesen hat.

Das ganze Gerüst des Kehlkopfes kann nach meiner Auffassung mit einer Art Zange (s. Fig. 27 A B C D) verglichen werden, welche aus zwei stumpfwinklig gekrümmten Blättern besteht, die in der Nähe der stumpfen Winkel wie bei einer Schere ineinander eingelenkt sind. Zwischen A und B einerseits und C und D andererseits befinden sich elastische Federn, deren Spannung verändert werden kann. Sind die beiderseitigen Spannungen (bei gleichen Hebelarmen usw.) gleich, so steht das Gerüst fest und um so fester, je größer diese Spannungen sind. Außerdem befindet sich zwischen den Spangen MA und MB noch eine schwächere Feder vv_1 mit ebenfalls wechselnder Spannung. Die großen Federn sind die verschiedenen Muskeln des Kehlkopfes, die alle zusammen (S. 641) das Kehlkopfgerüst feststellen. Die Feder vv_1 ist der Musculus vocalis. Es sind nun zwei Mechanismen der verschiedenen Spannung der Stimmbänder möglich. Nimmt die Spannung der Feder CD zu (vergleichbar der Tätigkeit des Musculus crico-thyreoideus anticus), so wird (mit der Feder AB) auch die Feder vv_1, d. h. das Stimmband gedehnt, wie das bei Merkel der Fall war. Bleiben die Spannungen der Federn AB und CD gleich oder nahezu gleich und ausreichend stark, so kann die Spannung der Feder vv, etwa durch Erwärmung, elektrische Durchströmung usf. in weiten Grenzen zu- oder abnehmen, ohne daß sich ihre Länge nennenswert ändert, während ihre Schwingungszeit außerordentlich stark verändert wird, vergleichbar der verschiedenen Spannung einer Violinsaite (beim Stimmen), die hierbei ihre Länge auch nicht ändert. Auch ein an seinen Enden festgeklemmter Muskel gleicht einer solchen Saite und gibt um so höhere Töne, je stärker er (bei stärkerer Reizung) gespannt wird (Harless, Ewald, Nagel). Auch kann die Feder vv_1, d. h. der musculus vocalis von verschiedenen Längen aus durch Tätigkeit seine Spannung ändern, wodurch wieder eine Anzahl verschiedener Spannungen möglich wird.

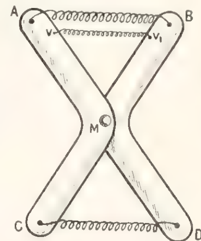


Fig. 27. Schema des Kehlkopfgerüstes durch die verschiedenen, antagonistisch wirkenden Muskeln festgehalten.

Die Stimmhöhe ändert sich 2. mit der Verkürzung der Stimmbänder, indem sich von hinten her die Gießbeckenknorpel mit ihren inneren Rändern immer mehr und mehr fest aneinanderlegen und so die schwingungsfähigen Abschnitte der Stimmbänder verkleinern, gleich einem Violinspieler, der die Saite verkürzt, indem er seinen Finger immer näher dem Stege auf das Griffbrett aufsetzt. Nach meinen allerdings nicht zahlreichen Beobachtungen steigen Leute mit hoher Stimmlage mehr nach dem zweiten, Bassisten, bei denen die Stimmritze dann hinten gelegentlich etwas offen ist (Merkel), mehr nach dem ersten Modus in die Höhe.

Sie ändert sich 3. mit der Stärke des Luftdruckes in der Luftröhre (s. S. 644).

Es ist nun im höchsten Maße wunderbar, wie geübte Sänger ganz genau einen Ton mit mehr oder weniger lauter Stimme treffen,

sei es, daß er ihnen vorgespielt wird oder daß sie ihn im Anschluß an einen anderen Ton nach Noten singen müssen. Hensen und Klünder konnten sich durch sinnreiche Versuche davon überzeugen, daß diese im wesentlichen nach dem Gedächtnis gesungenen Töne vielfach haarscharf getroffen werden, aber was vielen Sängern nicht recht glaublich erscheinen wird, nicht in vollkommen gleicher Höhe auch nur kurze Zeit ausgehalten werden können. Singt man z. B. gegen eine Königsche Flamme (s. S. 63), welche dann ganz genau mit den Luftschwingungen der menschlichen Stimme auf- und niederzittert und betrachtet diese zitternde Flamme in einem vertikalen, an die Zinke einer horizontal stehenden Stimmgabel befestigten Spiegel, der die auf- und niederhüpfende Flamme in die Breite zieht, so entsteht bei völligem Einklang oder genau konsonantem Verhältnis wie der Oktave zwischen Stimme und Stimmgabel eine stillstehende Flammenfigur. Weicht aber die Stimme auch nur eine ganz unhörbare Spur nach oben oder nach unten ab, so bewegt sich die Flammenfigur nach links oder nach rechts. Und das geschieht, wie gesagt, immer, selbst bei geübten Sängern in ihren bequemsten Mittellagen. Freilich sind die Fehler nicht groß, allerhöchstens 1,54%, d. h. statt eines Tones von 100 Schwingungen wird einer von 101,5 oder 98,5 Schwingungen zeitweilig gesungen. In der Regel beträgt der Fehler im Mittel nur 0,317%; er ist kleiner bei höheren, größer bei tieferen Tönen. Neuerdings haben Weiß und Sokolowsky durch sinnreiche Versuche unsere Kenntnis über diese Vorgänge noch erweitert und unter anderem gezeigt, daß für das ungenaue Treffen von (nicht vorgesungenen) Tönen vielfach die temperierte Stimmung unserer Musikinstrumente schuld ist.

Man kann auch diese Flammenbilder, wie ich das getan, groß an die Wand werfen. Fixiert man dann während des Singens die stehenden Bilder, so kann man auch den Ton viel sicherer und länger ganz fest halten, als wenn man sie nicht sieht. Man hat, so scheint es mir, wenn die Bilder stillstehen, ein gewisses Gefühl in den Stimmorganen, das man dann gewissermaßen mit dem Bilde festhält. Verlangt man von dem Sänger, den betreffenden Ton zu verstärken oder abzuschwächen, so sind natürlich die Fehler viel größer. Es ist aber im höchsten Maße erstaunlich, wie genau selbst trotz dieser Fehler ein Ton getroffen, gehalten und dabei auch noch in seiner Stärke verändert werden kann. Schon daß er im ersten Beginn häufig ganz genau getroffen wird, ist schwer zu verstehen; denn was den Sänger dabei leitet, da er den Ton etwa erst nach 10 Schwingungen erkennt, ist lediglich ein Muskelgefühl in den verschiedensten bei der Tonerzeugung beteiligten Muskeln. Soll nun gar die Stärke des Tones bei gleichbleibender Höhe verändert werden, so muß, weil ein stärkerer Luftdruck den Ton eines und desselben elastischen Bandes in die Höhe treibt, sich das Stimmband in demselben Maße in seiner Spannung vermindern, als der Luftdruck zunimmt. Bei Herabminderung der Tonstärke muß das Entgegengesetzte stattfinden (J. Müller).

Findet diese Regulierung in ungenügendem Maße statt, so verändert sich eben die Höhe des Tones, sei es allmählich in einer Richtung oder in Schwankungen (Herunterziehen, Tremolieren, Beben der Stimme).

6c) Weitere Eigentümlichkeiten der Stimme. Man kann schließlich auch sprechen ohne laute Stimme. Hierbei erzeugt der Kehlkopf ein Geräusch anstatt eines Klanges. Die so erzeugte „Stimme" heißt Flüsterstimme und kommt, wie schon Czermak zeigte, dadurch zustande, daß die Stimmritze mäßig geöffnet und nur in der Gegend der Stimmfortsätze ziemlich stark verengt ist (s. Fig. 28). Bewegt sich die Luft durch diesen Spalt, so entsteht ein eigenartiges Geräusch, welchem durch das Ansatzrohr auf das genaueste die Eigenschaften der verschiedensten, sonst stimmhaften Konsonanten und Vokale gegeben werden, mit welchem also gesprochen werden kann.

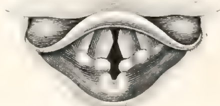


Fig. 28. Spiegelbild des Kehlkopfes bei Erzeugung der Flüsterstimme. Nach Czermak.

Noch sei erwähnt, daß manche Leute eine Doppelstimme erzeugen können, die nicht durch die Stimmbänder allein, was möglich wäre (Grützner), sondern nach neuen Untersuchungen durch sie und die Epiglottis (Scheier) zustande kommt. Hierbei erzeugen die Stimmbänder den hohen, die schwingende Epiglottis den (um eine Duodezime) tieferen Ton. Schließlich sei darauf hingewiesen, daß der Bauchredner seine Stimme durch verschiedene Mittel, wie Herabsetzung der Stärke und Dämpfung sie derjenigen einer entfernten oder eingeschlossenen Person auf irgendeine Weise, (denn die Methoden sind sehr verschieden) nachmacht und, was sehr wichtig ist, durch das nötige Geschick und schauspielerische Talent die Illusion erhöht (Flatau, Gutzmann usw.).

Auch ohne die Stimme des Kehlkopfes können Töne oder Geräusche (s. Sprache) im Ansatzrohr durch das Gaumensegel, die Zunge und die Lippen erzeugt werden. Werden die Lippen und die Zunge so eingestellt, daß sie einen Hohlraum bilden, der vorn und hinten eine kleine Oeffnung enthält, ähnlich einem Savartschen Jägerpfeifchen, so gibt derselbe, wenn er durchblasen wird,

Pfeiftöne von sich, die nach der Größe des Hohlraums und seiner Oeffnungen, sowie nach der Stärke des Anblasens verschieden hoch und stark sind.

7. Die Stimme der Tiere. Die Stimme der dem Menschen nahestehenden Säugetiere wird in ganz ähnlichen Organen erzeugt, über welche auch der Mensch verfügt. Lunge, Luftröhre, Kehlkopf und Ansatzrohr gleichen im wesentlichen durchaus den gleichnamigen Organen des Menschen.

Viele Säuger, denen die Stimmbänder ganz fehlen, wie den Walen, dem Delphin und anderen, sind völlig stumm, gleich den äußerlich ihnen nahestehenden Fischen; andere wie die höheren Affen und viele gesellig lebende Tiere verfügen über verschiedene Stimmlaute, die gelegentlich denen der menschlichen Stimme ähnlich sind; vielfach trifft man, namentlich bei Affen (Brüllaffen), resonatorische Hilfsapparate am Hals (s. Fig. 9), gewissermaßen Ausbuchtungen der Morgagnischen Ventrikel (R. Fick, E. Meyer), welche die Stimme bedeutend verstärken. Je nach der Größe der Tiere bewegt sich ihre Stimme von tiefem lautem Geheul oder Gebrüll bis zu dem feinsten, ganz hohen Gequieke. Auch über Brust- und Fistelstimme, sowie über exspiratorische und inspiratorische Stimme verfügen viele Säuger (s. oben S. 642).

Eigenartig und von hohem Interesse ist die Stimme der Vögel, unter denen viele geradezu „Sänger" sind und nach dieser Kunst ihren Namen führen (Singvögel). Alle Vögel haben mindestens zwei Kehlköpfe, zunächst einen oberen, der anatomisch dem des Menschen entspricht. Er ist leicht am Ende der Zunge zu sehen, wenn man etwa einer Taube oder einem Huhn den Schnabel aufsperrt. Bei jeder Atembewegung gehen seine beiden seitlichen Hälften mehr oder weniger auf und zu, ganz ähnlich den Stimmbändern höherer Tiere. Dieser obere Kehlkopf aber erzeugt keine Töne, nur bei manchen Vögeln eigentümliche klappernde oder anderweitige Geräusche. Der Stimmkehlkopf der Vögel, wenn man so sagen darf, mit dem Namen Syrinx belegt (während der eigentliche obere Kehlkopf bei Vögeln und anderen höheren Tieren bekanntlich Larynx heißt), liegt mitten in der Brust, an der Teilungsstelle der Luftröhre.

Diese selbst, bei langhalsigen Vögeln oft außerordentlich lang, besteht meistens aus geschlossenen festen, knöchernen Ringen und bildet an ihrem unteren Ende — wenn ich die Verhältnisse natürlich nur schematisch darstelle (s. Fig. 29a), da die anatomischen Einrichtungen im einzelnen sehr kompliziert und bei den verschiedenen Vögeln sehr verschieden sind — einen im Frontalschnitt (die Brust des Vogels wie beim Menschen vertikal gedacht) ungefähr fünfseitigen knöchernen Hohlraum (Tympanum) a b c d e. Der Ring (genauer gesagt der äußere Halbring) des ersten (obersten) Bronchus setzt sich mit einer elastischen Membran m_1 c bezw. m_2e (Membrana tympaniformis externa) mit dem Tympanum bei c bezw. e in Verbindung. In d befindet sich ein von vorn nach hinten gehender knöcherner Steg, der jederseits als Fortsetzung von der inneren membranösen Wand des Bronchus df und dg einen membranösen Ueberzug hat. Wird nun die Luftröhre durch Muskelzug nach abwärts, gleichsam auf die Bronchien heraufgezogen, wobei der Winkel fdg sich vergrößert (s. Fig. 29b), so springen bei c und bei e, sowie bei d jederseits kleine Falten in den Hohlraum des linken und rechten Bronchus vor, das sind die Stimmbänder (eigentlich Stimmbänderpaare M_1e und M_2e, sowie M_3i und M_4i, Membrana tympaniformis externa und interna), die von der Lunge aus angeblasen, die Stimme des Vogels ertönen lassen. Wird andererseits die Luftröhre durch entgegengesetzten Muskelzug nach oben gezogen (s. Fig. 29a), so streckt sich der ganze Stimmapparat in die Länge, der Winkel f d g verkleinert sich und die genannten nach innen einspringenden Falten verstreichen beiderseits vollkommen; Luftröhre und Bronchien werden frei durchgängig. Erwähnt sei noch, daß bei den mit besonders kunstfertiger Stimme begabten Vögeln (Papageien, krähenartigen Vögeln usw.) sich an dem Syrinx selbst noch mehrere (5 bis 7) Muskelpaare befinden.

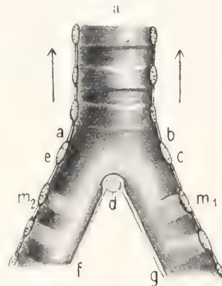


Fig. 29a. Luftröhre und Bronchien eines Vogels in gestrecktem Zustande durch Zug der Luftröhre nach oben (s. Pfeile ↑).

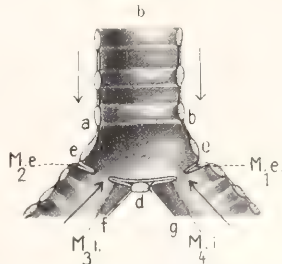


Fig. 29b. Luftröhre nach unten gezogen (s. Pfeile ↓), wodurch Schleimhautfalten in die Bronchien (die Stimmbänder) einspringen. Schematisch.

Daß in der Tat im Syrinx die Stimme des Vogels zustande kommt, ist seit langer Zeit bekannt (vgl. hierüber O. Weiß, woselbst auch die umfangreiche Literatur in sorgfältiger Weise zusammengestellt ist). So hat z. B. Cuvier einer singenden Amsel die Luftröhre am Halse durchschnitten, ohne daß die Stimme des Vogels aufhörte. Offen bleibt die Frage, ob wie bei den höheren Tieren alle Stimmtöne durch Zungenpfeifen entstehen, wie wohl meistens (Cuvier, J. Müller u. a.) angenommen wird, oder ob der Vogel in seiner Stimme nicht auch Pfeiftöne (d. h. Lippenpfeiftöne, wie wir in unseren Lippen, s. oben S. 650) hat. Ich möchte, da ja die Syrinxzungen oft so außerordentlich zart und klein sind und die von solchen, auch künstlichen Zungen erzeugten Töne den Pfeiftönen vielfach ganz ähnlich sind, ebenfalls glauben, daß auch bei den Vögeln ihre „offizielle Stimme" eine Zungenpfeifstimme ist. Aber vollkommen sicher ist das nicht. Denn wer will wissen, ob nicht irgend ein Vogel auf eine uns noch ganz unbekannte Weise auch „pfeifen" kann? Kommen doch selbst im menschlichen Kehlkopf freilich als allergrößte Seltenheiten Pfeiftöne vor.

Ueber die Stimmen der Reptilien und Amphibien ist wenig zu sagen.

Die Schildkröten sind ziemlich schweigsame Tiere, können aber doch gelegentlich — wie zur Paarungszeit — geräuschähnliche Töne erzeugen. Die Schlangen vermögen nur zu zischen; denn das Klappern der Klapperschlange, was sie mit der an ihrem Schwanze befindlichen Klapper ausführt, dürfte als Stimme nicht bezeichnet werden. Die meisten Krokodile dagegen, die einen verhältnismäßig großen und plumpen Kehlkopf mit mehr oder weniger knorpelführenden Stimmbändern haben, erzeugen gelegentlich, ich habe noch nie ein Krokodil schreien hören, ein dumpfes, lautes, grunzendes Gebrüll (Brehm u. a.) oder meistens wohl im Schmerz ein hohes, kreischendes Geschrei.

Die Amphibien haben ebenfalls einfache Stimmapparate und sind sehr verschieden mit Stimme begabt. Eine eigentliche Luftröhre fehlt ihnen.

Die geschwänzten Lurche, z. B. Salamander, Tritonen sind stille Tiere; um so lauter sind ihre nächsten, etwas höher stehenden, ungeschwänzten Verwandten, wie Frösche, Kröten usw. Viele Arten sind mit resonatorischen Apparaten begabt, mit denen sie sich das nötige Gehör verschaffen, wie unser Wasserfrosch und Laubfrosch, nebenbei bemerkt nur der männliche.

Die Fische sind bekanntlich stumm und die Töne oder Geräusche, welche sie erzeugen, haben kaum auf den Namen Stimme einen Anspruch. Es ist ja auch nicht ganz sicher, wenn auch wohl wahrscheinlich, daß sie hören (Piper).

Wenn man z. B. einen Schlammpeizger aus dem Wasser nimmt, so gibt er ein feines hohes Piepen oder Quieken von sich. Wahrscheinlich macht er eine Saugbewegung mit seinen Lippen, wie sonst an festen Körpern unter Wasser. Hier saugt er sich mit den Lippen fest, in der Luft tönen sie. Andere Fische, wie der Knurrhahn (Trigla) und der Flughahn (Dactylopterus) erzeugen knarrende Geräusche durch Erzitterung ihres Körpers und der Schwimmblase oder durch Reibung in bestimmten rauhen Gelenken, ähnlich dem Quarren einer schlecht geschmierten Tür.

Ich wende mich zu der Stimme der Wirbellosen und zwar zur Stimme der Insekten, indem ich unter Stimme nicht eine mit irgendeiner Bewegung notwendig verbundene Schallerscheinung verstehe, wie etwa das Summen beim Fluge. Der Flugton, dessen Höhe natürlich von der Zahl der Flügelschläge in der Sekunde abhängt und bei einer Stubenfliege z. B. gegen 330, das ist etwa e', bei einer Stechmücke 594 = d'' beträgt, ist nicht der einzige Ton, den die Insekten erzeugen können. Sie können vielmehr auch, wenn man ihnen die Flügel abgeschnitten hat, noch einen anderen, gewöhnlich höheren Ton erzeugen, über dessen Ursachen man nocht nicht im klaren ist.

Landois ist der Meinung, daß die aus den mit feinen Häutchen versehenen Luftlöchern (Stigmaten) oder einem Stigma austretende Luft, z. B. bei den Bienen, diesen Ton erzeugt. Beachtenswert scheint mir, daß diese „Stimme der Insekten" immer nur ertönt, wenn sie mit den Flügeln schlagen, niemals wenn sie dieselben still halten. Wenn Bienen sehr aufgeregt sind und einen stechen wollen, es auch gelegentlich tun, so hört man oft einen sehr hohen, in seiner Höhe wechselnden, s-artigen Ton, der ihr Kampfgeschrei zu sein scheint.

Von den Schmetterlingen erzeugt meines Wissens nur der Totenkopf (Sphinx atropos) ein piependes Geräusch, welches in dem Vorderteil seines Körpers zustande kommt, wahrscheinlich durch Anblasen einer Zunge (Prochnow).

Ganz anders und sicher nachgewiesen in ihrer Entstehung sind gewisse Töne bei vielen Käfern (Laufkäfern, Schwimmkäfern, Totengräbern u. a.) und Grillen. Hier finden wir eigenartige namentlich von Landois genauer untersuchte Apparate, sogenannte Stridulationsorgane, d. h. fein geriefte, feste Platten, über welche mit einem anderen festen Körper hinweggefahren wird, etwa so wie man mit einem Fingernagel über einen feinen Kamm hinwegfährt oder umgekehrt.

Nimmt man irgendeinen Bockkäfer (Cerambix) oder einen kleinen roten Lilienkäfer (Crioceris) in die Hand und hält ihn ans Ohr, so hört man dieses eigentümliche hohe Zirpen, welches im wesentlichen dadurch zustande kommt, daß das Tier seinen Brustkorb oder einen Teil seines Körpers gegen den nächsten Leibesring reibt. Auf dem geriebenen oder reibenden Teile ist eine erhabene Leiste mit vielen Querrillen (s. Fig. 30), ihr gegenüber befindet sich, z. B. bei Cerambix cerdo, ein messerscharfes erhabenes Leistchen, über welches die Rillen geführt werden. Die Höhe des Tones hängt natürlich von der Zahl der Rillen in der Längeneinheit und der Geschwindigkeit ab, mit welcher über die Rillen gefahren wird. Landois macht die zutreffende Bemerkung, daß manche derartig erzeugten Töne für unser Ohr zu hoch sind, um wahrgenommen

zu werden, aber sehr wohl von den betreffenden Insekten wahrgenommen werden können: denn sie dienen zur Anlockung der Geschlechter in der Paarungszeit (Regen).

Am vollkommensten sind die Stridulationsorgane ausgebildet bei den Heuschrecken und erzeugen hier überaus laute Töne. Man braucht nur an einem schönen Sommertag übers Feld zu gehen, um das Gezirpe dieser Tiere zu hören. Bei der Feldheuschrecke (Stenobrathus) hat Landois die Verhältnisse näher untersucht. Das Tier — meistens sind es die Männchen — hat an der inneren Seite seines Hinterbeines (s. Fig. 31a) eine rauhe Leiste, die sich bei stärkerer Vergrößerung als aus lauter kleinen lanzettförmigen Spitzen (s. Fig. 31b) zusammengesetzt erweist. Mit dieser Leiste reibt nun das Tier wie der Violinspieler mit dem rauhen Bogen die Saite so eine bestimmte hervorspringende feste Ader des benachbarten Flügels und erzeugt so das Getön. Bei anderen ähnlichen Tieren, z. B. bei der Feldgrille (Gryllus campestris) reibt ein mit einer Schrillleiste versehener Flügel an einer hervorspringenden Ader des anderen Flügels.

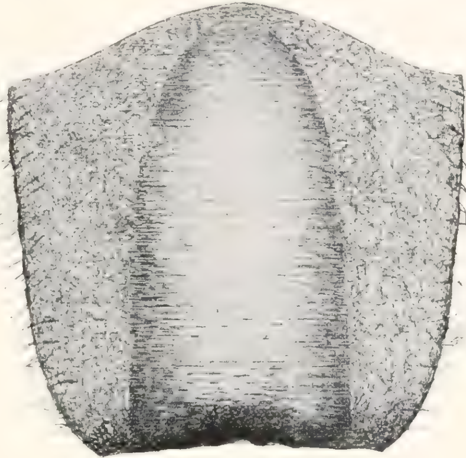


Fig. 30. Stridulationsorgan von Cerambix cerdo, 40 mal vergrößert. Nach Prochnow. Es zeigt die feinen parallelen Rillen, über welche das ihnen parallele scharfe Leistchen des benachbarten Körperteils geführt wird.

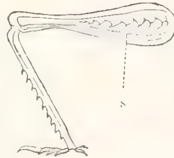


Fig. 31a. Hinterbein der Feldheuschrecke von der inneren Seite. Dreimal vergrößert, s die Schrilleiste mit den eben sichtbaren Zähnchen.

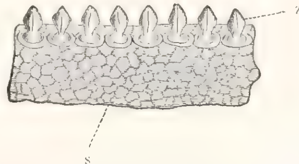


Fig. 31b. Ein Teil der Schrilleiste s 100mal vergrößert, z die Zähnchen. Nach Landois.

Noch eines Wortes bedarf die Stimme der Cicaden, die ebenfalls sehr laut ist und wenn sie — wie häufig — im Chorgesang ertönt, weithin gehört wird. Auch über sie besteht eine große Literatur (Réaumur, Rösel von Rosenhof, neuerdings Landois, P. Mayer, Prochnow u. a.). Mir scheint folgendes das wesentliche zu sein. Der Leib der Cicade — nebenbei gesagt, wiederum nur der männlichen — stellt einen hohlen elliptischen Chitinkasten dar, an dessen Bauchseite ziemlich weit vorn zwei Muskeln in etwa rechtem Winkel von einander nach links und nach rechts an die Seitenteile des Chitinpanzers ziehen, der hier mit einer eigenartigen, dünnen Trommelhaut überspannt ist. Wenn nun der oder die betreffenden Muskeln erzittern, so wird an diesem ganzen elastischen, vortrefflich resonierenden Apparat gezupft und so entsteht ein Ton, ganz ähnlich demjenigen unserer „Waldteufel", die man namentlich in Norddeutschland auf den Weihnachtsmärkten hört. Ein Modell eines Singapparates der Cicade kann man sich nach meiner Meinung leicht in folgender Weise darstellen. Einen festen Hohlzylinder oder ein zylindrisches Glasgefäß überzieht man mit einer

elastischen Membran, etwa einer Schweinsblase, und klebt auf ihre Mitte ein leichtes geharztes Holzstäbchen an. Fährt man mit den Fingern über dieses Stäbchen, so wird je nach den Verhältnissen des Modells ein hoher oder tiefer, ziemlich lauter, quarrender Ton erzeugt.

II. Die Sprache.

Die Sprache ist, rein objektiv betrachtet, weiter nichts als eine Reihe von Klängen und Geräuschen, die in dem Kehlkopf und in dem Ansatzrohr des Menschen erzeugt und in bestimmter Reihenfolge hintereinander ausgesprochen werden. So entstehen, in jeder Sprache verschiedene, besondere Klangbilder, mit denen sich ein bestimmter Sinn verbindet. Die Bausteine, aus denen sich das Gebäude der Sprache aufbaut, sind die Laute.

Man hat sich von jeher bemüht, die Laute in zweckmäßiger Weise einzuteilen, was aber nicht leicht ist, da man verschiedene Einteilungsprinzipien zugrunde legte. Meines Erachtens wird man sowohl das akustische, wie das genetische Prinzip zur Einteilung heranziehen müssen. Schon im Altertum (Aristoteles) unterschied man tönende, im Kehlkopf erzeugte Laute (Vokale) und solche, die erst im Ansatzrohr, d.h. von der Zunge und den Lippen gebildet werden (Konsonanten). Freilich wäre es falsch, zu sagen, daß nur die Vokale mit Stimme, die Konsonanten aber ohne Stimme erzeugt würden; denn viele Konsonanten, wie M, N u. a. werden stets mit Stimme erzeugt. Wohl aber ist dieser Unterschied, worauf namentlich die Phonetiker (Sievers, Thausing) hinweisen, insofern zutreffend, als die Vokale tatsächlich Stimmträger sind, die Konsonanten aber nicht. Auf ihnen, den Vokalen, ruht die Stimme ziemlich lange und auch die verstärkte Stimme, der Akzent. Wir wollen also bei dieser alten Einteilung stehen bleiben und mit den Stimmträgern, den Vokalen, beginnen.

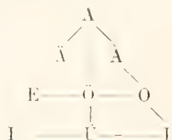
1. Die Vokale. 1a) Die Bildung der Vokale. Von jeher hat man drei Grundvokale unterschieden, die in ihren Klängen die größten Verschiedenheiten darbieten, nämlich das I, A und U und zwar zweckmäßig angeordnet in folgender Dreiecksform

```
   A
  / \
 J — U
```

womit gesagt sein soll, daß das A gewissermaßen der Grundvokal ist, aus dem die anderen hervorgehen. Es hat dies insofern eine gewisse Berechtigung, als das A auf breitester Basis bei außerordentlich verschiedenen Mundweiten erzeugt werden kann, wie ja auch das kleine Kind, das noch nicht sprechen kann, einen A-artigen, (nach dem Ä hinziehenden) Laut von sich gibt.

Wenn man nämlich bei mäßig geöffnetem Mund ein A erzeugt, so entstehen durch ganz allmähliche Verengerung der Mundöffnung, während welcher die Stimme natürlich fortwährend tönt, eine ganze Reihe von Vokalen, aus denen sich zunächst ein dem A naheliegendes O heraushebt, wie es in vielen deutschen Dialekten und vielen Sprachen (o im Französischen, z. B. in encore, Å im Schwedischen) gesprochen wird; dann ein reines O, welches durch beliebige Zwischenlaute zwischen O und U in ein U übergeht. Die umgekehrte Bewegung der Lippen führt natürlich von einem U zu einem A. Stellt man jetzt wiederum den Mund für ein A ein, läßt ihn geöffnet, hebt aber von unten her die Zunge immer mehr und mehr an den Gaumen heran, was man gut im Spiegel sehen oder auch mit dem Finger fühlen kann, so ertönen Zwischenlaute, die durch ein Ä, E in ein I übergehen.

Stellt man schließlich die Lippen für ein U (oder einen Laut der U O A-Reihe) und die Zunge für ein I (oder einen Laut der A EI-Reihe) ein, so erhält man ebenfalls Zwischenlaute, z. B. zwischen U und I unser Ü. Folgendes Schema erläutert diese Verhältnisse.



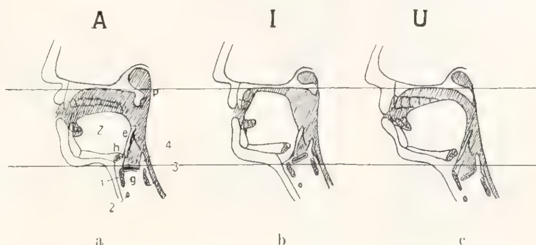
Die geraden Linien zeigen den Weg an, auf welchem die betreffenden Laute liegen. In der Mitte befindet sich ein Ö, zu welchem man wohl am ungezwungensten und leichtesten auf dem Wege vom O zum E kommt, indem man die Lippen zu einem O einstellt und ohne dieses O (wie in Ofen) laut auszusprechen und die Stellung der Lippen zu verändern, versucht ein E zu sagen. Es ertönt zwangsmäßig ein Ö (Gutzmann).

Die untern Ecken des Dreiecks sind die Grenze für die Vokalerzeugung; denn verengert sich bei dem U die Lippenöffnung noch mehr, so mischt sich dem reinen Klange ein eigenartiges Geräusch bei, wir hören den Konsonanten W und zwar das seltene Lippen-W. Geht man auf der anderen Seite der Vokale vom I aus ebenfalls immer weiter in der Verengerung des Ansatzrohres (hier in der Annäherung der vorderen Zunge an den Gaumen) so verschwindet auch hier der Vokalcharakter und es entsteht ein charakteristisches Geräusch, das vordere Ch. wie in Ich.

Man hat sich viel Mühe gegeben, durch direkte Messungen, in letzter Zeit auch durch Aufnahme des Kopfes von der Seite vermittels Röntgenstrahlen (Scheier, E. A. Meyer, Grunmach, Barth u. a.), die charakteristischen Gestalten der die verschiedenen Vokale erzeugenden Ansatzrohre festzustellen; aber die Sache ist recht schwierig. Günstigenfalls erhält man höch-

stens den sagittalen mittleren Durchschnitt des Ansatzrohres, das, wenn man gar messende Apparate oder anderweitige Dinge, wie Ketten, Metallbleche usw. in den Mund führt, gar leicht seine normale Gestalt bei der Sprache verändert.

Fig. 32a. Querschnitt des Kopfes bei der Aussprache des A. p weicher Gaumen, Z Zunge, e Epiglottis, h Zungenbein, g Glottis (Stimmritze), 1 Schildknorpel, 2, 3 Ringknorpel, 4 Gießkannenknorpel. Fig. 32b. Die Stellung bei I mit der retortenförmigen Mundhöhle. Fig. 32c. Die Stellung bei U. Charakteristisch die enge Lippenöffnung. Zum Teil nach Landois.



Wir beginnen mit dem A. Bei ihm ist die Mundhöhle ein nach vorn gerichteter offener Trichter, der sich vorn aber nur ganz wenig verengert (s. Fig. 32a). Je mehr diese Verengerung fortschreitet (s. Fig. 33, 1, 7, 9), wodurch wie bei den Resonatoren der Eigenton der Mundhöhle immer tiefer wird, um so mehr verändert sich von einem bestimmten Grade an der Vokalklang und es entstehen die Laute Å, O und U.

Bei der A E I-Reihe hebt sich lediglich die Zunge mehr und mehr in die Höhe und bildet, indem sie sich hierbei immer mehr dem harten Gaumen nähert, eine lange schmale Spalte, die beim I am engsten ist. Zugleich zieht sie sich etwas von vorn nach hinten zusammen und erzeugt so einen großen, zuerst von Purkinje genauer beschriebenen hinteren Kehlraum. Das Ansatzrohr für das I gleicht somit im sagittalen Durchschnitt einer Retorte mit ziemlich langem und engem Hals (s. Fig. 32b). Bei dem E und Ä sind die Ansatzrohre ähnlich gestaltet, nur wird der Kehlraum kleiner und das vordere engere Ansatzstück, der Hals der Flasche oder Retorte, weiter. Die charakteristischen Lippenstellungen bei der Bildung der Vokale zeigen die Abbildungen Figur 33, 1 bis 10.

Die Stellung des Kehlkopfes ist häufig, aber keineswegs immer bei dem U am tiefsten. Vielfach ändert sich seine Stellung nicht nachweisbar.

Tönt schließlich die Stimme während des Ueberganges und zwar wesentlich während des Ueberganges von einem zu einem anderen Vokal, so entstehen die Diphthonge, z. B. das AU, welches mit dem A beginnt und dem U schließt. Viele Vokale werden im Deutschen und in anderen Sprachen diphthongisch gesprochen, ohne so geschrieben zu werden. Die Schreibweise der Diphthonge (wie etwa die des Ei und Eu) ist keineswegs immer so korrekt wie z. B. beim AU; denn weder das Ei noch das EU beginnen mit einem E.

Einer besonderen Erwähnung bedarf noch das Gaumensegel bei der Bildung der Vokale. Es bildet naturgemäß einen um so festeren Verschluß von unten nach oben, je enger die Ausgangsöffnung des Ansatzrohres und demnach je größer der Widerstand des austretenden Luftstromes ist. Bei dem A, wie schon Czermak fand, ist ein dichter Verschluß nicht vorhanden (das Gaumensegel steht ziemlich tief), bei dem I und U steht es höher und der Verschluß ist dichter (s. Fig. 32, a bis c). Eine Myrtenblattsonde, durch die Nase bis nach hinten an die Halswirbelsäule eingeführt — wie ich das an mir zu zeigen pflege, — bleibt bei der Aussprache des A ruhig liegen, bewegt sich dagegen in bestimmter Art, welche die Hebung des Gaumensegels andeutet, bei der Aussprache des I und des U.

Läßt man bei der Aussprache von Vokalen das Gaumensegel herabhängen, so daß die Nasenhöhlen wesentlich und die Mundhöhle verhältnismäßig geringer resoniert, so werden die Vokale nasaliert ausgesprochen. Am besten eignen sich die mittleren Vokale A und O, am wenigsten die Grenzvokale U und I zur Nasalierung. Selbstverständlich entweicht, sobald die Vokale den nasalen Beiklang haben, die Luft auch durch die Nase, was unter verschiedenen anderen Maßnahmen ein zweckmäßig vor die Nase gehaltener kalter Spiegel durch Beschlagen anzeigt.

1b) Die akustischen Eigenschaften der Vokale (Theorie der Vokale). Ein Vokalklang hat, wie jeder Unbefangene ohne weiteres zugeben wird, etwas ihm durchaus Eigentümliches. Kein anderer Klang ist ihm gleich, ähnlich freilich sehr viele, namentlich diejenigen, welche ihren Namen nach Vokalklängen führen, wie Summen, Stöhnen, Klappern, Piepen usw.

Obwohl man jeden Vokal — natürlich innerhalb gewisser Grenzen — in den verschiedensten Tonhöhen hervorbringen kann, wohnt



Fig. 33. Die Mundstellungen bei Bildung der Vokale A E I O U von vorn und von der Seite.

doch einem jeden eine Eigenschaft inne, die an eine bestimmte Tonhöhe erinnert, das U ist scheinbar tiefer als das A, dieses wieder tiefer als das I (Reyer 1619, Stellwag 1780, v. Kempelen 1791).

Diese Tatsache führt uns zur Theorie der Vokale und zwar zunächst zu ihrer künstlichen Nachbildung. Wir haben gehört (S. 644), daß ein frei präparierter Kehlkopf einer menschlichen Leiche, in zweckmäßiger Weise hergerichtet und angeblasen, einen Klang gibt ähnlich demjenigen einer anderen ähnlichen, membranösen Zungenpfeife, erst durch das über ihm befindliche Ansatzrohr wird er gewissermaßen menschlich und vokalisch. Die ersten Versuche, Vokale nachzubilden, bestanden daher darin, über tönende Zungen Röhren (Willis 1832) oder irgendwie zweckmäßig gestaltete Hohlkörper (Katzenstein 1782, v. Kempelen 1791) aufzusetzen. Und in der Tat gelang es so, vielleicht am besten dem Anfertiger der ersten Sprechmaschine (v. Kempelen) Vokalklänge mit Ausnahme des I ziemlich gut nachzubilden. Dabei gaben die längeren Ansatzröhren, welche angeblasen bekanntlich tiefere Töne erzeugen, die dumpfen Vokale O, U, die kürzeren die helleren Vokale A, E. I. Willis aber fertigte dann noch einen zweiten, höchst originellen, kürzlich zu großer Wichtigkeit gelangten Apparat an, vermittels dessen er vokalähnliche Klänge erzeugen konnte. Der Apparat war folgendermaßen hergerichtet. Ein gezahntes Rad drehte sich mit der nötigen Geschwindigkeit, so daß ein an seine Peripherie gelegtes Stäbchen (ähnlich wie bei der einfachen Savartschen Sirene) je nach der Schnelligkeit der Drehung und der Zahl der gleichabständigen Zähne einen Ton oder Klang von bestimmter Höhe bildete; die ihn erzeugenden Stöße nannte Willis die primären Impulse. Wenn man nun dieses Stäbchen, welches nur einfache Stöße erzeugte durch eine kurze, schnellschwingende Feder ersetzte, so folgten jetzt in kürzeren oder längeren Abständen voneinander sehr kurze Tonstücke, bedingt durch die Schwingungen der Feder, die sogenannten sekundären Impulse, wie folgende schematische Zeichnung (s. Fig. 34) klar macht, in welcher 1, 2, 3, 4 die einzelnen Luftstöße des Stäbchens und a b c d bezw. $\alpha \beta \gamma \delta$ die ebenso schnell hintereinander folgenden Tonstücke darstellen soll. Es entstand wieder ein Klang, im vorliegenden Fall von derselben Tonhöhe der ursprünglichen primären Impulse 1 2 3 4; dieser Klang aber hatte jetzt, je nachdem die Tonstücke höheren oder tieferen Tönen angehörten (vgl. a b c d und $\alpha \beta \gamma \delta$), einen verschiedenen vokalischen Charakter und zwar vernahm man bei langsameren sekundären Impulsen (a b c d) mehr dumpfe, O- oder U-ähnliche, im anderen Falle (α β γ δ) mehr helle, A E I-ähnliche Klänge.

Drehte man das Rad schneller oder langsamer, so blieb innerhalb gewisser Grenzen der Vokalklang bestehen; nur änderte er seine Tonhöhe, eine für die Theorie der Vokale überaus wichtige Tatsache.

Weiterhin wurde von verschiedenen Forschern (Wheatstone 1837, Graßmann 1857, Donders 1857) darauf hingewiesen, daß die Mundhöhle für verschiedene Vokale verschieden abgestimmt sei und zwar war sie — ganz ähnlich wie bei der Erzeugung künstlicher Vokale durch verschiedene Ansätze — bei den dumpfen Vokalen für tiefere, bei den hellen Vokalen für höhere Töne abgestimmt. Am einfachsten kann man sich hiervon überzeugen vermittels einer gewöhnlichen A-Stimmgabel. Schlägt man dieselbe an und hält sie, wenn man die Lippen für ein A einstellt, vor den Mund, so tönt sie laut. Verengert man aber die Lippenöffnung nur

ein wenig zu einem O oder vergrößert sie zu einem A, so hört der Ton der Stimmgabel auf oder wird ganz schwach. Unsere Mundhöhle ist bei der Bildung des A genau auf das Stimmgabel-A abgestimmt.

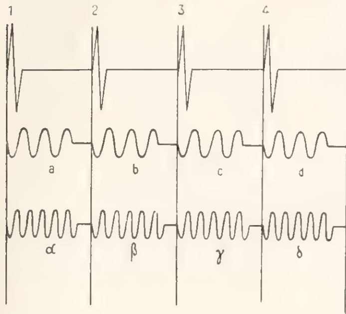


Fig. 34. 1, 2, 3, 4 die hintereinander folgenden einzelnen Erschütterungen des Stäbchens; a b c d die eben so schnell hintereinander erfolgenden Tonfragmente der Feder. Die Schwingungszahlen des tiefen Stäbchentones 1 2 3 4 verhalten sich zu denjenigen der höheren a b c d wie 4:1, dagegen zu denen des noch höheren $\alpha\,\beta\,\gamma\,\delta$ wie $6^2/_3$:1. Der erste tiefere ist harmonisch zu dem Stäbchenton, der zweite höhere nicht. Immer wenn die Feder auf einem Zahn des Rades ruhig liegt, schweigt sie, daher die horizontalen Linien zwischen den kleinen Klangkurven.

Auf Grund der genannten Tatsachen, sowie weiterer eigener Untersuchungen kam schließlich Helmholtz 1877 zu seiner berühmten Theorie der Vokale, die sich an die allerersten Versuche der künstlichen Erzeugung von Vokalen anschließt. Helmholtz sagt nämlich: Die Vokale sind zusammengesetzte Klänge einer membranösen Zungenpfeife, nämlich des Kehlkopfes, in denen durch ein Ansatzrohr von bestimmter Gestalt, wie einen mehr oder weniger weit geöffneten Mund, ein bestimmter Oberton besonders verstärkt wird. Diese verstärkten Obertöne von immer der gleichen Höhe charakterisieren den Vokal. „Wenn ich z. B. den Vokal A auf die Note Es singe, ist der verstärkte Ton b″ der zwölfte des Klanges und wenn ich denselben Vokal auf die Note b′ singe, ist es der zweite Ton des Klanges, der verstärkt wird.“ Man bezeichnet diese Tatsache, in welcher ein höherer oder niederer Oberton von immer der absolut gleichen Höhe das Hauptcharakteristikum eines Vokals ausmachen soll, als absolutes Moment in der Vokaltheorie.

Es ist bekannt, daß jedem Unbefangenen irgendein Klang, sagen wir der einer Trompete, einer Singstimme usw. einen durchaus einheitlichen Eindruck macht, in welchem man nichts anderes, als eben diesen Klang hört. Nur durch gewisse Hilfsmittel kann man aus solch einem Klange, am leichtesten wohl aus dem einer Saite, etwa einer angeschlagenen Klaviersaite noch andere Töne (Obertöne), wie die Oktave oder die Quinte in der Oktave heraushören, weil sie eben in dem Klange enthalten sind. Dies gelingt aber mühelos, wenn man diese Obertöne besonders verstärkt. Und das hat Helmholtz erreicht durch seine Resonatoren, d. h. abgestimmte, mit einem kurzen, in das Ohr zu steckenden Ansatzrohr versehene offene Hohlkugeln. Steckt man einen solchen Resonator ins Ohr, so dröhnt oft der Oberton, auf den der Resonator abgestimmt ist, laut ins Ohr. Dasselbe findet natürlich auch statt bei einem Vokalklang, aus welchem dann die betreffenden charakteristischen Obertöne laut herausklingen; eine Tatsache, die man dann zur Untersuchung von Vokalklängen angewendet hat (F. Auerbach).

Dem absoluten Moment steht nun aber auch ein relatives Moment gegenüber, welches folgendes besagt. Ein Klang kann reich oder arm an Obertönen sein, er kann wesentlich nur die tieferen, z. B. die beiden ersten, ein anderer die höheren, z. B. den 6. bis 8. Oberton und den 7. verhältnismäßig stark enthalten, was natürlich ihre verschiedene Klangfarbe bedingt. Ist ein Klang tief und erhält er nur wenig niedere Obertöne, und auch diese nur schwach, so klingt er stets dumpf und gleicht einem U. Verschiebt sich nun das ganze Klangbild nach oben oder nach unten um einige Tonstufen, wodurch also alle Klangbestandteile ihre absolute Höhe ändern, aber ihre relativen Höhen und Stärkeverhältnisse zueinander beibehalten und bewahrt trotzdem der Klang seinen Charakter (nur daß er in anderer Höhe ertönt), so sagt man, daß das relative Moment den Vokalklang bestimme, wie dieses der Fall wäre, wenn z. B. immer ein Ä ertönte, sobald der 7. Oberton stark hervortritt, mag der Grundton hoch oder tief sein.

Man wird sagen, die eine Theorie schlösse die andere aus und doch ist das nicht der Fall, wie Helmholtz und später Auerbach zeigten. Kurz gesagt, es ist eben ein Vokal akustisch dem anderen nicht völlig gleichwertig und beide Momente bestimmen nicht selten nebeneinander den vokalischen Charakter. So ist, ohne daß ich hier auf Einzelheiten eingehen kann, nach Graßmann bei den Vokalen U, Ü, I das absolute Moment, bei dem einzig dastehenden A dagegen das relative und bei den Zwischenlauten O, Ö, E sowohl das eine wie das andere Moment von ausschlaggebender Bedeutung. Neuerdings wird das in dieser Bestimmtheit bestritten.

Wir wenden uns nun zu den neueren und neuesten Versuchen und Anschauungen über die Klänge der Vokale

und müssen da in erster Linie die Aufzeichnung der Vokalklänge besprechen. Donders hat wohl als erster vermittels des Phonautographen von Scott und König die Klänge der Vokale dadurch zu fixieren versucht, daß er sie gegen eine feine, über einen ausgebauchten trichterförmigen Hohlraum aufgespannte Membran sang oder sprach und deren Schwingungen auf einen rotierenden Zylinder aufzeichnete. So erhielt er kleine gezackte Kurven, die für jeden Vokal verschieden waren. Alle späteren graphischen Methoden beruhen auf demselben Prinzip. Aber die späteren Kurven sind mit den ersten kaum zu vergleichen; denn die inzwischen fortschreitende Technik und Wissenschaft (ich nenne nur die Namen Telephon und Phonograph) lehrten uns Membranen kennen und herstellen, die sich ganz genau an die Erschütterungen der Luft bei den verschiedenen Vokalen anschmiegten, während die alten Dondersschen Membranen sozusagen mehr nach ihrem eigenen Kopf schwangen. Indem ich nur auf die Arbeiten von Barlow, Schneebeli, Hipp, Blake, Preece, Stroh, Boeke hinweise, die alle demselben Ziele wie Donders mit mehr oder weniger Erfolg zustrebten, bleibe ich stehen bei den Namen Hensen und Pipping einerseits und Hermann andererseits. Hensen konstruierte zunächst einen vortrefflichen „Sprachzeichner", dessen allerdings sehr kleine, nur durch das Mikroskop zu lesenden Kurven sicher genau die Bewegungen der Vokalklänge wiedergeben, während Hermann ebenso gute, aber noch greifbarere Ergebnisse dadurch erhielt, daß er die Schwingungen einer gleich guten Membran, wie die Hensensche war, durch einen gewichtslosen Hebel, nämlich einen Lichtstrahl vergrößerte und sie photographisch fixierte. Die angesungene Membran bewegte nämlich ein ganz kleines leichtes, an sie befestigtes Spiegelchen, auf welches ein greller elektrischer Lichtstrahl fiel. Seine auf und nieder gehenden Bewegungen wurden auf eine senkrecht zu ihnen vorbeigeführte, hochempfindliche photographische Platte (bezw. Zylinder) aufgezeichnet. Die so erhaltenen Kurven sind das Schönste und Vollkommenste, was man sich denken kann. Des weiteren hat Hermann auch noch derartige auf eine Phonographenwalze eingedrückte Vokalklänge in ähnlicher Art aufgezeichnet und hatte dann, indem er den Schreiber des Phonographen noch einmal denselben Weg machen ließ, den er sich selbst gegraben hatte, und dabei genau die gesungenen Vokale hörte, die vollkommene Sicherheit, daß seine Zeichnungen durchaus genau und richtig waren. Man kann auch, wie dies kürzlich Réthi in vollkommener Weise tat, die Vertiefungen des Schreibstiftes durch ein Hebelwerk vergrößern und so tadellose Kurven von Vokalen und sogar von Konsonanten erhalten. Die so gewonnenen Vokalkurven sind nun der Ausdruck von einer Summe verschiedener Töne. Wir sahen schon oben, daß Helmholtz die Vokale als Klänge, d. h. als eine Summe von Tönen auffaßte, nämlich einem Grundton und verschiedenen harmonischen Obertönen, aus denen einer sich durch besondere Stärke hervorhob. Hermann kommt nun auf Grund seiner Kurven, sowie anderweitiger Betrachtungen und Versuche zu einer anderen Anschauung über das Wesen der Vokale. Ein Ton in bestimmter Höhe spielt dabei ebenfalls eine wichtige Rolle, aber in anderer Art als bei Helmholtz. Hermann sagt nämlich, ein von uns erzeugter Vokalklang entsteht im wesentlichen dadurch, daß die auf einen bestimmten Ton abgestimmte Mundhöhle intermittierend, immer nur auf ganz kurze Zeit durch die Luftstöße, die bei der Oeffnung der schwingenden Stimmbänder entstehen, angeblasen wird. Es entsteht also ein Vokal, ganz ähnlich wie es Willis behauptete, aus kurz dauernden Tonstößen, welche in einem bestimmten, schnelleren oder langsameren Rhythmus aufeinanderfolgen (s. Fig. 34 a b c d). Hierbei wird die Höhe des Vokals durch die Schwingungszahl der Stimmbänder, die Art des Vokals durch den Eigenton der Mundhöhle, den sogenannten „Formanten" bedingt. Dieser Formant aber braucht gerade so wie bei dem Versuch von Willis in keinem konsonanten Verhältnis zu dem Grundton zu stehen, also durchaus nicht ein Oberton desselben zu sein. Eine Vokalkurve nach Hermann würde also in der Hauptsache so aussehen wie Figuren 34, a b c d bezw. $\alpha\ \beta\ \gamma\ \delta$, bei denen kurze Tonstöße durch Zwischenräume unterbrochen werden. Die Zahl der Wellen aber braucht nicht das Zwei-, Drei- oder Vierfache usw. von denjenigen des Grundtons zu sein, d. h. keinen harmonischen Oberton desselben zu erzeugen.

Denke ich mir daher die Pausen (die horizontalen Striche zwischen den Tonwellen) ein wenig länger, so daß der Grundton ein wenig tiefer wird, so ändert sich der Vokalklang nicht; denn sein Charakteristikum, der Formant, hat sich ja nicht geändert, auch wenn er unharmonisch zu dem etwas tieferen Grundton geworden wäre.

Hensen und Pipping treten nun dieser Anschauung von Hermann entgegen, weil ihre Analyse der Vokalkurven nach dem Fourierschen Prinzip, auf das hier nicht näher eingegangen werden kann, ihnen keine unharmonischen Töne in einem Vokalklang aufweist und weil sie auch keine unharmonischen Töne in einem Vokalklang hören.

Ersteres ist aber unmöglich, weil die Analyse irgendeines Klanges nach diesem Prinzip immer nur zu harmonischen Tönen führt, ähnlich wie die Zerlegung unserer gewöhnlichen ganzen Zahlen immer zu einem Mehrfachen der Zahl 1 führt. Das andere aber, das Heraushören des Formanten aus dem Vokalklange ist deshalb nicht unbedingt zu verlangen, weil der Formant ja nicht fortwährend oder wenigstens eine kurze Zeitlang kontinuierlich erklingt — und um einen Ton zu hören, ist das notwendig, — sondern immer nur auf ganz kurze Zeiten (s. oben Fig. 34). Hensen und sein Schüler Pipping vertreten mehr die ältere Ansicht von Helmholtz, wobei Pipping freilich nicht bloß von der Verstärkung eines harmonischen Obertones, sondern einer Gruppe einander naheliegender Töne, einem sogenannten „Verstärkungsgebiet" spricht. Noch ist also das letzte Wort über das Wesen der Vokale nicht gesprochen, wenn auch eine Reihe der wichtigsten Tatsachen durch schwierige und geistvolle Untersuchungen ans Licht gebracht worden sind und die wesentlichen Eigenschaften dieser Laute sowie ihre Entstehung sichergestellt sein dürften. Hierzu ist man, wie bereits angedeutet, gelangt durch ihre Analyse und ihre Synthese, über die noch das Folgende zu sagen ist.

1c) Die Analyse der Vokale. 1. Die Analyse der Vokale erfolgte von Helmholtz und Auerbach zunächst auf subjektivem Wege durch die Resonatoren, vermittelst deren man aus den Klängen die verschiedenen Obertöne, namentlich die stärkeren deutlich heraushören konnte.

2. Bei weitem wichtiger aber ist die schon oben angedeutete objektive Analyse, d. h. die Auflösung der verschiedenen, von einer angesungenen Membran geschriebenen Vokalkurven.

Wir haben oben (s. Fig. 4 und 35) ausgeführt, daß ein einfacher Ton durch pendelartige Be-



Fig. 35. Die gewellte Linie rührt von einer Stimmgabel her, die nur einen einfachen Ton gibt, die gezackte von einer angestrichenen Violinsaite, die weil von dieser einfachen Schwingung stark abweichend, reich an Obertönen ist.

wegungen der Luft erzeugt wird, während jedwede andere, ebenso häufig erfolgende periodische Bewegung der Luft aus Tönen zusammengesetzte Klänge erzeugt. Beide Wörter werden übrigens promiscue gebraucht. Man kann nun alle diese Bewegungen, wie die einfachen einer Stimmgabel oder die zusammengesetzten einer angestrichenen Violinsaite oder die ebenfalls zusammengesetzten von Vokalklängen, wie schon mehrfach angedeutet, auf einen rotierenden Zylinder aufschreiben.

So schreibt eine Membran, die sich einem Vokalklang genau anschmiegt, eine eigenartig unregelmäßig geformte Kurve, wie solche in Figur 36 zu sehen sind.

Sie sind von Hermann gezeichnet, d. h. photographisch aufgenommen und zeigen folgendes. Die 4 ersten sind die Luftschwingungen, die bei dem Vokal A

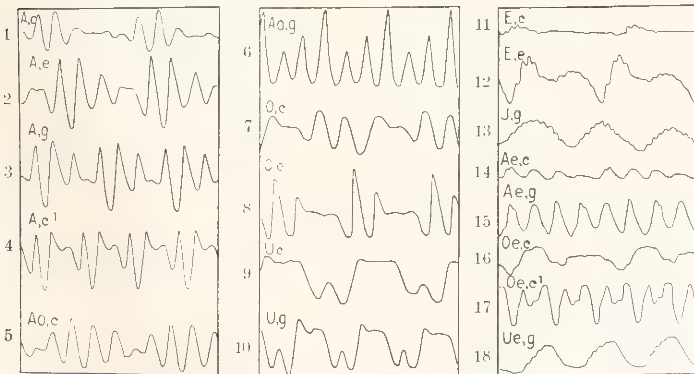


Fig. 36. Vokalkurven nach Hermann. Im allgemeinen zeigen sich gröbere Zähnelungen bei den tieferen Vokalen A, O, U, feine bei Ae und E und die feinsten bei I.

auftraten, je nachdem er auf den Ton c, e, g, c′ gesungen wurde; die Kurven 5 und 6, diejenigen eines auf die Töne c und g gesungenen Å usw. Alle diese wunderlichen Schwingungsformen oder Erzitterungen kann man sich nun in hier nicht näher zu schildernder Weise durch Ausmessung ihrer jeweiligen Höhen, nach einem bestimmten mathematischen Gesetz in harmonische Schwingungen, die sich zu einander verhalten wie 1 : 2 : 3 : 4 usw., zerlegen, wobei man in der Tat findet, daß z. B. für das A, in verschiedenen Höhen gesungen ein Ton, in der Gegend von f^2 bis gis^2 besonders hervortritt. Das widerspricht nebenbei nicht der Auffassung von Hermann, die von der Verstärkung eines oder mehrerer harmonischer Obertöne nichts wissen will, denn anstatt des nichtharmonischen Formanten erscheinen durch die Fouriersche Analyse nur ihm benachbarte Obertöne verstärkt. Hingewiesen sei schließlich noch auf die größeren und gröberen Zähnelungen der Kurven bei A, O und U und auf die außerordentlich feinen beim E und namentlich beim I. So ist denn in der Tat nach Hermann die Lage der Formanten, welche mit den anderweitig gefundenen Mundtönen (s. S. 656) ziemlich übereinstimmt folgende:

	Nach Hermann (bei 2 Formanten der stärkere gesperrt)	Nach Pipping („Verstärkungsgebiete")
für U	erster Teil der 1. und der 2. Oktave	bei d^1 bis f^1
„ O	erster Teil der 2. Oktave	„ g^1
„ Ao	erster Teil der 2. Oktave, etwas höher	„ e^1 und dis^3
„ A	Mitte der 2. Oktave	„ gis^2 und dis^3
„ Ae	Anfang der 2. und Mitte der 3. Oktave	„ g^2 und fis^3
„ E	Anfang der 2. und Ende der 3. Oktave	„ fis^3 und cis^4
„ Oe	Mitte der 3. Oktave, etwas tiefer als bei Ae	„ f^1 und g^3
„ Ue	Ende der 3. Oktave	„ d^1 und c^4
„ I	erster Teil der 4. Oktave	„ d^1 und cis^4

Kurze Vokale haben etwas tiefer liegende Formanten.

Man sieht, die faktische Divergenz in den Tatsachen ist nicht so groß, wenn man auch unzweifelhaft die Helmholtzsche Anschauung zurückweisen muß, daß bei einem Vokalklang immer nur ein Oberton durch Resonanz verstärkt werden müsse; denn wenn z. B. ein Bassist ein I singt, so müßte der 20. bis 30. Oberton verstärkt werden. Der ist aber so schwach oder, besser gesagt, gar nicht in dem Klange vorhanden, daß er auch nicht verstärkt werden kann. Aber angeblasen kann er werden.

Sowie man die Schwingungen der Vokalklänge aufschreiben und dann analysieren kann, so kann man sich und anderen diese Schwingungen auch noch in anderer Weise sichtbar machen, z. B. indem man den von einem Spiegelchen der angesungenen Membran zurückgeworfenen Lichtstrahl auf einen sich drehenden Königschen Spiegel (s. nachfolgendes) fallen läßt. Die Kurve erscheint groß und glänzend an der Wand (Samoilow u. a.). Anstatt einer Membran haben Weiß und Garten eine Seifenlamelle angesprochen und deren Schwingungen in sinnreicher Weise photographiert.

Es gibt schließlich noch eine andere, ungemein zierliche und einfache, wenn auch nicht so genaue Methode, diese verschiedenen Schwingungen sichtbar zu machen, das ist die Methode der Königschen Flammenbilder.

Wenn man nämlich ein Rohr R in einen flachen Hohlzylinder leitet, dessen gegenüberliegende Wand mit einer Membran MM_1 (s. Fig. 37) überspannt ist, so gerät dieselbe in bekannter Weise in Schwingungen, sobald man sie durch das Rohr, welches in einen passenden Trichter T endet, ansingt. Diese

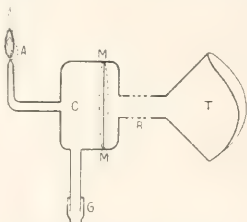


Fig. 37. Der Apparat für die Königschen Flammenbilder ohne Spiegel.

Membran aber bildet die Wand eines luftdicht an dem ersten anliegenden Zylinders C, durch welchen Gas in G einströmt. Wird es bei A angezündet und die Membran angesungen, so bewegt sie sich in den Gasraum hinein bei jeder Druckerhöhung und aus ihm heraus bei jeder Druckherabsetzung (s. die punktierten Linien MM_1). Hierdurch verlängert oder verkürzt sich die kleine Flamme A und gibt, in den senkrechten Wänden eines sich drehenden kubischen Spiegels, zierliche gezackte Bilder, welche bei verschieden hohen Tönen, sowie bei

verschiedenen Vokalen, die auf ein und denselben Ton gesungen werden, charakteristische Verschiedenheiten darbieten (s. Fig. 38). Sie sind allerdings nicht so einfach zu deuten, da die in der Gaskapsel herrschenden, sehr schnell wechselnden Drucke sich in Geschwindigkeiten des ausströmenden Gases umsetzen (Nagel). Bewegt man über die Flamme ein weißes Papier, so zeichnet sie ineinander verschlungene, schwarze Kreise von Ruß (Marbe).

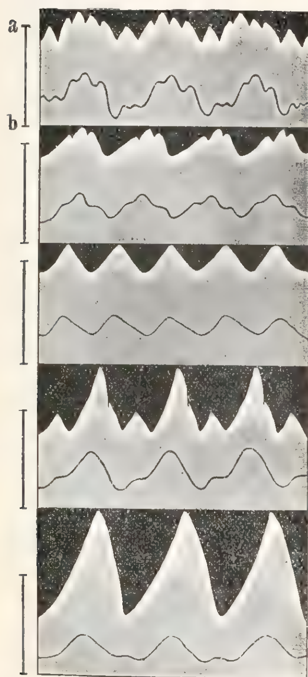


Fig. 38. Die verschiedenen Flammenbilder der Vokale A, E, I, O, U in dem Königschen Spiegel, alle gesungen auf c′ = 256 Schwingungen. Die seitliche Linie a b und die unter ihr stehenden bezeichnen die Höhe der Flamme in der Ruhe. Die dünnen schwarzen Kurven unter den Flammenbildern sind Klangkurven (s. S. 666). Nach Landois.

1d) Die Synthese der Vokale. 1. Auf Grund dieser analytischen Versuche kann man nun auch einen Vokalklang synthetisch zusammensetzen. Der erste, der dies tat, war Helmholtz. Hierzu brauchte er auf Grund seiner Anschauungen einen einfachen Grundton und eine Reihe der ihm zugehörigen Obertöne, die er entweder alle oder nur wenige und in verschiedener Stärke erzeugen mußte. Das erreichte er, ohne daß ich hier in Einzelheiten eingehen kann, folgendermaßen. Eine große Stimmgabel von n Schwingungen wurde nach Art einer elektrischen Klingel durch einen elektrischen Strom in Schwingungen gesetzt; die auf diese Weise erzeugten intermittierenden Ströme gingen durch 8 Elektromagneten, welche dadurch 8 kleinere Stimmgabeln von den Schwingungszahlen 2n, 3n, 4n .. 9n zum Tönen brachten. Auch wenn alle Gabeln schwangen, hörte man nur ein ganz leises Summen, da der ganze Apparat auf Gummischläuchen stand. Den 8 kleineren Stimmgabeln gegenüber befanden sich 8 auf ihre Töne genau abgestimmte Resonatoren, deren Mundstücke geschlossen oder mehr oder weniger geöffnet werden konnten. Waren sie geschlossen, so hörte man so gut wie Nichts von den Stimmgabeln (wenn sie auch schwangen); waren sie dagegen ganz oder teilweise geöffnet, so tönten sie laut oder leise. Die große treibende Stimmgabel war auf den Ton B gestimmt, die 8 kleinen auf b, f, b^1 usw. Die große Stimmgabel allein gab einen ganz dumpfen, U-ähnlichen Klang, wie er in unserer Sprache gar nicht vorkommt; ließ man b und f^1 schwach mittönen, so wurde er dem U unserer Sprache ähnlicher. Ein sehr schönes O erhielt Helmholtz, indem er b^1 stark angab, daneben schwächer b, f^2, d^3 und den Grundton B schwach mitklingen ließ. Um ein A zu erzeugen, mußte man die letzten 4 Obertöne möglichst stark hervortreten lassen und die unteren schwächen usf.

2. Ein zweiter, ebenfalls von Helmholtz angegebener, sehr schöner und ungemein einfacher Versuch, um einen Vokalklang aus seinen einzelnen Tönen zusammenzusetzen, besteht in Folgendem. Wenn man in ein geöffnetes Klavier, in welchem die Saiten durch Aufhebung des Dämpfers frei schwingen können, einen Vokal hineinspricht oder was besser ist, ohne die geringste Detonation hineinsingt, so klingt nach dem Aufhören der Stimme der gesungene Vokal auf das deutlichste aus dem Klavier heraus. Spricht oder singt man mit näselnder Stimme hinein, so klingt ganz dieselbe Stimme heraus. Denn alle Obertöne, welche in den betreffenden Klängen enthalten waren, finden sich in den Saiten des Klaviers, welche mittönen und zwar stark oder schwach, je nachdem die ihnen zukommenden Töne selbst stark oder schwach in dem Klang enthalten waren. Der heraustönende Klang ist gewissermaßen

ein genaues Spiegelbild von dem hineingesungenen.

3. Wenn man eine Vokalkurve in Kreisform genügend groß ausschneidet und sie an die Peripherie einer Scheibe versetzt, so kann man sie gleich einer einfachen Sirene durch einen radiären Spalt anblasen. Es ertönt bei entsprechender Tonhöhe der charakteristische Vokal (Hermann).

4. Aehnliche Lufterschütterungen erhält man auch von einer Telephonmembran, wenn man, wie ich das meines Wissens zuerst versucht habe, eine dünne, in ihrer Peripherie bestimmt ausgeschnittene Scheibe aus weichem Eisen zwischen den Stirnflächen eines Telephonmagneten rotieren läßt und die Ströme in ein Telephon leitet. Diese von Hermann ausgearbeitete und verbesserte Methode gibt ziemlich gute Vokalklänge.

5. Weiter kann man aber auch durch Interferenz von zwei Klängen Vokalklänge erzeugen. Gibt man nämlich auf der Helmholtzschen Doppelsirene gleichzeitig die Töne fis_2 (711 Schwingungen) und gis_2 (800 Schwingungen) an, so erklingt der Differenzton Fis_2, von $800 - 711 = 89$ Schwingungen mit deutlichem A-Klang, weil ein Ton von der Höhe des A-Formanten (etwa 750) 89mal in der Sekunde auf- und abschwankt (s. S. 660).

6. Schließlich sei noch einer hierher gehörigen Untersuchungsreihe von mir und Sauberschwarz gedacht, in welcher wir allerdings nicht Vokalklänge aus ihren einzelnen Elementen zusammensetzten, sondern diese Elemente aus den Vokalklängen durch Interferenz beseitigten und dann feststellten, was übrig blieb. Es ergab sich, um nur eines hervorzuheben, daß die Auslöschung des Grundtones den charakteristischen Vokalklang im allgemeinen wenig schädigte. Der Vokal klang nur, wie aus der Ferne gerufen. Auslöschung der charakteristischen Töne (Formanten) vernichtete ihn dagegen mehr oder weniger rasch. Das A hielt sich am besten.

Die Bedeutung dieses absoluten Momentes tritt auch in einem interessanten Versuch vermittels des Edisonschen Phonographen hervor, dessen Bau wir im allgemeinen als bekannt voraussetzen. Spricht oder singt man nämlich einen Vokal in denselben hinein und reproduziert ihn mit anderer Drehgeschwindigkeit des Zylinders, so müßte, falls nur das relative Verhältnis der Einzeltöne zueinander für den Vokalklang allein oder wesentlich maßgebend wäre, sich derselbe hierdurch gar nicht verändern. Er tut es aber, weil natürlich durch schnellere Drehung des Zylinders der Formant erhöht und durch langsamere vertieft wird. Die verschiedenen Vokale verhalten sich hierbei wieder verschieden (Hermann).

2. Die Konsonanten. 2a) Die Nasale M, N und Ṅ. Wie schon oben erwähnt, gibt es Konsonanten mit und ohne Stimme. Unter den stimmhaften, die man, wenn längere Zeit hintereinander in gleicher Stärke ausgesprochen, geradezu als Vokale bezeichnen kann, sind die Laute M, N, Ṅ (ng). Man bezeichnet sie aber als Konsonanten, weil sie keine oder nur äußerst selten Stimmträger sind, sondern gewissermaßen die Stimme über sich weg auf die Vokale gleiten lassen (Sievers). Diesen drei Lauten ist gemeinschaftlich der Verschluß des Mundrohres und das Offenhalten des nasalen Ansatzrohres, durch welches also der tönende Luftstrom entweicht. Der Klang M wird gebildet, indem man die Stimme bei geschlossenen Lippen tönen läßt. Wird das M, wie gewöhnlich konsonantisch gebraucht, so mischt sich ihm noch ein, wenn auch schwaches Geräusch der Schließung oder Oeffnung der Lippen bei. Das vokalisch tönende M ist sehr arm an Obertönen, klingt deshalb sehr dumpf.

Das N (alveolare) entsteht, wenn bei tönendem Kehlkopf die Zunge an dem harten Gaumen hinter den Zähnen sich anstemmt und einen dichten Verschluß bildet. Sein Klang ist heller.

Das Ṅ (ng der Deutschen, wie in Klingel oder Trunk) ist ein tönender Laut, der sich stets an vokalische Klänge anschließt und durch Verschluß der hinteren Abschnitte der Zunge mit dem gegenüberliegenden Gaumen gebildet wird. Liegt der Verschluß weiter vorn, so hört man das Ṅ in Klingel, liegt er weiter nach hinten, das Ṅ in Klang. Die Zunge stellt den Verschluß immer auf dem kürzesten Wege her. Denn beim I und E ist sie dem harten, bei A, O oder U dem weichen Gaumen stark genähert.

2b) Die L-Laute. Sie haben entschieden viel mehr Konsonantisches an sich, als die eben genannten, denn ihrem Klang mischt sich deutlich etwas Geräuschartiges bei. Unser gewöhnliches L (das L alveolare) wird gebildet, indem der Rand der Zunge dicht oberhalb der Vorder- und Backenzähne sich an den harten Gaumen (Fig. 39) anlegt, dabei aber zwei kleine seitliche Lücken in der Gegend der ersten Backenzähne übrig läßt.

Da es sehr schwer ist, genau die Stellen zu bestimmen, an denen sich bei Bildung von Lauten die Zunge mit den gegenüberliegenden Mundteilen fest berührt, habe ich die Zunge dick mit Karmin oder chinesischer Tusche bestrichen und dann den betreffenden Laut möglichst deutlich und

zwanglos ausgesprochen. Die Stellen, an denen die Zunge am Gaumen usw. anliegt, färben sich deutlich und oft in recht überraschender Weise. In Figur 39 sieht man die Stellen der Berührung. Wenn die Zunge

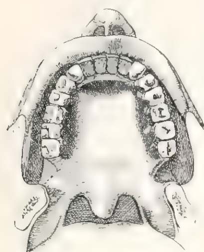


Fig. 39. Die Berührungsstellen der Zunge mit dem Gaumen sind in Wirklichkeit rot gefärbt, hier dunkel schraffiert. Durch die kleinen Spalten zwischen den beiden ersten Backzähnen entweicht der tönende Luftstrom bei der Bildung des L.

sich tiefer nach hinten anlegt, wird der Charakter des L ein anderer und tieferer, wie in manchen Dialekten und in slawischen Sprachen (z. B. das ł der Polen). Neuerdings hat man auch den Gaumen gefärbt und die Zunge frei gelassen. Man erhält dann im wesentlichen das Negativ meiner Bilder, die namentlich bei fehlerhafter Aussprache gute Ergebnisse liefern (Gutzmann).

2c) Die Zitterlaute. Eine ganz besondere Stellung nehmen die Zitterlaute ein, weil ihr Klang nicht gleichmäßig, sondern intermittierend oder remittierend abläuft, indem in dem Ansatzrohr sich ein leicht beweglicher, schwirrender Körper befindet, der das Ansatzrohr im Wechsel öffnet und schließt. Ist es offen, so tönt die Stimme laut, ist es geschlossen, so sinkt ihre Stärke bedeutend, aber wohl nie ganz. Unterbrechen 1. die zitternden Lippen den Klang des Kehlkopfes, so ertönt das Lippen-R, das gelegentlich von uns gesprochen, aber in unserer Sprache nicht bezeichnet wird. 2. Das gewissermaßen offizielle R, welches der Redner und Schauspieler aussprechen soll, ist das R alveolare. Es erzittert bei ihm der vordere Teil der Zunge, der sich an den vorderen Teil des Gaumens bis an die vorderen Zähne schwirrend anlegt, während der hintere Teil der Zunge dauernd und fest an den Hinterzähnen liegt (s. Fig. 40). Um ein R zu charakterisieren, gehören oft wenig Schläge. Schon Kempelen gibt sie richtig auf 2 bis 3 an, wenn es zwischen zwei Vokalen



Fig. 40. Artikulation des R alveolare.

ertönt. Am Ende eines Wortes wird oft nur einer gehört (s. Fig. 41). Schwingt 3. das Zäpfchen, indem es sich in eine kleine Rinne der Zunge legt, so ertönt das Zäpfchen-R, R uvulare oder Berliner R, das vielfach dem Zungen-R Konkurrenz macht, weil es für viele bequemer zu bilden ist. In der Regel nimmt das R von benachbarten Vokalen vokalischen Charakter an. Schließlich können 4. auch, wie Brücke angibt, die Stimmbänder schnarrend zusammenschlagen und ein Geräusch erzeugen, welches dem Quarren der Frösche nicht unähnlich ist. Dieses Kehlkopf-R findet sich im Plattdeutschen (in den Worten ort (Art), Dürt (Dorothea) usw. und im Englischen in lord, bird usw.

2d) Die Reibelaute, Zischlaute. Werden die Widerstände, welche sich dem tönenden Luftstrom entgegenstellen, immer größer, d. h. die Engen selbst immer kleiner und schwieriger zu passieren, so überwiegt mehr und mehr das Geräusch, welches schließlich ganz allein übrig bleibt, während die unter 2a bis c genannten Laute ohne Stimme nicht gebräuchlich sind. Es entstehen dann die tonlosen oder tönenden Reibe- oder Zischlaute und zwar zunächst A) Die vorderen. a) Das F und W. Beginnen wir wiederum mit den vordersten Engen, so kommen wir zu einem in unserer Sprache



Fig. 41. I. Die Kurve des deutlich artikulierten Zungen-R. In den Momenten, in welchen die Zunge dem Gaumen anliegt, verschwindet die Stimme (die Zähnelungen) fast ganz. II. Die Kurve des Zäpfchen-R; die Intermissionen der Stimme sind nicht so bedeutend. Nach Donders.

nicht üblichen, aber gelegentlich gebrauchten Laut, der entsteht, wenn wir die Lippenöffnung möglichst klein machen und mit der nötigen Kraft durch diese Enge blasen, etwa so, wie wenn wir Staub entfernen wollten. Dieses dann entstehende Geräusch können wir F bilabiale nennen. Das eigentliche F entsteht aber dadurch, daß die Oberzähne sich auf die Unterlippe setzen und die Luft durch diese entstehende kleine Lücke getrieben wird, deren einer Rand (die Zähne) scharfkantig ist. Sein Geräusch ist deshalb viel schärfer als das des vorigen, bei welchem die Enge von weichem, abgerundetem Material, den Lippen, gebildet wird.

Verbindet sich mit diesen Geräuschen die Stimme, so erhalten wir Laute, die als W bezeichnet werden, wie unser W und das V der Franzosen.

b) Die eigentlichen Zischlaute, S-Laute. Schreitet die Enge weiter rückwärts, so entstehen der Reihe nach andere Laute.

1. Bei einer Enge zwischen Oberzähnen und Zunge ein in unserer Sprache nicht üblicher Zischlaut (nur Leute, von denen wir sagen, sie stoßen mit der Zunge an, bilden diesen Laut), nämlich das harte th der Engländer wie in thing, das ϑ der Neugriechen, vielleicht auch der Altgriechen. Es hat akustisch und genetisch die größte Aehnlichkeit mit dem F, mit dem es auch gelegentlich verwechselt wird oder in das es in der Entwickelung von Sprachen übergeht. Dickens läßt z. B. den gemeinen Mann gelegentlich statt nothing nuffing reden und das griechische ϑ wird im Russischen ein F (Theodor, Feodor; Athanasia, Afanasia usw.). Wohl wesentlich die größere Feuchtigkeit der Zunge gegenüber der der Lippen bedingt diesen Unterschied der beiden Geräusche.

2. Unser gewöhnliches S (s. Fig. 42), wohl der bekannteste und weithin gehörte Zischlaut, der deshalb auch häufig zu Interjektionen, wie um Ruhe zu gebieten u. dgl. angewendet wird, entsteht dadurch, daß wir eine Enge zwischen der Zungenspitze, die sich dabei ein wenig aushöhlt, und den Schneidezähnen mit dem vordersten Gaumen bilden. Die Schärfe erhält der Laut aber erst dadurch, daß die beiden Zahnreihen auf eine kleine Entfernung einander genähert werden. Sein Geräusch ist sehr hoch, d. h. man kann in ihm außerordentlich hohe Obertöne nachweisen (s. unten S. 666 und Fig. 44).

3. Das Sch der Deutschen, über dessen Bildung eine überaus große Literatur vorliegt, wird, wie meine Farbenmethode unmittelbar ausweist, durch eine größere, weiter nach hinten liegende Enge erzeugt, die durchblasen werden muß. Um den Laut zu verschärfen, werden die Zahnreihen einander stark genähert. Das Geräusch des Sch ist viel tiefer, als dasjenige des S, weil die durchblasene Höhle viel größer ist als beim S, eine



Fig. 42. Artikulation des S, bei der die kleine Lücke hinter den Schneidezähnen durchblasen wird.

Tatsache, die Meister Kempelen bei der Konstruktion seiner Sprechmaschine praktisch verwertet hat (s. Fig. 43). Tönt bei der Bildung dieser Laute zugleich die Stimme, so hören wir die weichen (tönenden) Zischlaute, wie unser S im Anlaut in sagen, während das französische S im Anlaut wie in soeur bekanntlich scharf ist. Das tönende S schreibt der Franzose mit Z. Das tönende Sch kommt als Anlaut in unserer Sprache kaum vor, sondern nur das scharfe, tonlose (wie in schaben, Schutz usw.), wohl aber regelmäßig in der französischen wie in jour usw.



Fig. 43. Artikulation des Sch, der durchblasene Hohlraum ist viel größer als bei dem S. Die Lücke zwischen Zunge und Gaumen liegt viel weiter hinten und ist viel breiter.

B. Die hinteren Reibelaute.

a) Das Ch. In unserer Sprache werden noch zwei Engen zur Erzeugung von Lauten gebraucht, nämlich eine vordere und eine hintere Zungen-Gaumenenge. Nähert sich die Zunge den vorderen Teilen des Gaumens etwas mehr als sie schon bei der Bildung des I ist und brandet die durch diese Enge getriebene Luft lediglich am Gaumen (nicht an den scharfen Zähnen), so ertönt ein Laut, wie in ich, Pech usw. Liegt die Enge weiter nach hinten, wie dies in geringerem Grade schon bei den Vokalen A, O und U der Fall ist, der in gleicher Art bezeichnete,

aber doch ganz verschieden klingende Laut, wie in Ach, Woche usw.

Ertönt mit diesen Lauten die Stimme, so entsteht im ersten Falle das deutsche J, wie in Ja und im zweiten ein dialektisches, tönendes Ch, wie in Lache (Lage), Bochen (Bogen).

b) Das H. Daß auch die Stimmritze eine Enge bilden kann, die durchblasen zu einem Geräusch Veranlassung gibt, haben wir bei der Erzeugung der Flüsterstimme erwähnt. Wird die Enge entsprechend verkleinert und die Luft stärker hindurchgeblasen, so entsteht ein charakteristisches Geräusch, nämlich unser H, der Spiritus asper der alten Griechen (ʽ).

2e) Die Verschluß- oder Explosionslaute. Während die bis jetzt beschriebenen Konsonanten gleich wie die Träger der Stimme, die Vokale, beliebig lange hervorgebracht werden konnten, sind die jetzt zu beschreibenden Kinder des Augenblicks. Sie ertönen nur einen Augenblick infolge einer mehr oder weniger gewaltsamen Sprengung eines Verschlusses.

A. Die Lippenexplosionslaute, das P und das B. Werden die Lippen geschlossen und ihr Verschluß durch Luftdruck gesprengt, so entsteht ein P, ein überaus einfacher Laut, der wie das M selbst dem kleinen Kinde keine Mühe macht und in Verbindung mit dem am leichtesten zu sprechenden Vokal A zum „Papa" oder zur „Mama" führt. Beschließt das P irgendein Wort, so wird es meistens auch durch Sprengung des Lippenverschlusses charakterisiert: es wird, wie man sagt, „aspiriert" Man spricht nicht ap und ak, sondern aph und akh Auch beim Anlaut spricht der Deutsche in der Regel das P und andere ähnliche Laute aspiriert aus. Er sagt Phaul, Khal, Thal usw., während der Franzose und Slawe diese Laute nicht aspiriert. Die einfache Bildung des Verschlusses ohne seine Sprengung erzeugt streng genommen jene Laute nicht, sondern nur ihnen ähnliche (Sievers)

Ertönt während der Sprengung des Verschlusses (oder was häufig bei Franzosen und Italienern vorkommt, schon ganz kurz vor der Sprengung) die Stimme, so hören wir ein B (bezw. eine Art von MB). Dieser Umstand ist meines Erachtens der wesentliche Unterschied zwischen den sogenannten harten und weichen Lauten, den Tenues und den Mediae, über die geradezu Bücher geschrieben worden sind. Ich weiß sehr wohl, daß viele Forscher die Stärke der Explosion als charakteristisch für diese Lautgruppen annehmen; aber diese Unterscheidung ist, wenn auch vorhanden, doch unzureichend und schlecht, weil sie zu fortwährenden Verwechselungen führt und weil selbst die stärkste tönende Lippenexplosion immer ein B bleibt und niemals zu einem P wird.

B. Die vorderen Zungenexplosionslaute, das T und das D. Die bewegliche Zunge kann von vorn bis hinten sich an verschiedene Stellen des Gaumens fest anstemmen und diese Verschlüsse können unter Bildung bestimmter Geräusche gesprengt werden. Die Erfahrung aber hat ergeben, daß auf diese Weise nur zweierlei Arten von bestimmten, gut von einander unterscheidbaren Lauten gebildet werden, kurz gesagt, die T- und die K-Laute.

Stemmt sich die Zunge an die Vorderzähne und den hinter ihnen liegenden harten Gaumen an (wobei die Anlagestelle in ziemlich weiter Ausdehnung von vorn nach hinten schwanken kann), so entsteht durch die Sprengung dieses Verschlusses ohne Stimme das T, mit Stimme das D. Je nachdem der Verschluß weiter nach vorn oder nach hinten liegt, d. h. im wesentlichen schmaler oder breiter ist, worauf Sievers mit Recht aufmerksam macht, oder was auch vorkommt, die Zunge mit ihrer Unterseite sich an den Gaumen stemmt, entstehen verschiedene Arten von T, auf die aber hier nicht genauer eingegangen werden kann.

C. Die hinteren Zungenexplosionslaute, das K und das G. Alle K-Laute werden mit dem Zungenrücken gebildet, der sich hinter der Mitte des harten Gaumens oder an den harten und weichen Gaumen zugleich anstemmt und durch den Luftdruck abgerissen wird. Hierbei entsteht im ersteren Falle das K in Kirche, im zweiten das in Kugel. Diesen K-Lauten entsprechen, wenn zugleich die Stimme ertönt, die entsprechenden G-Laute, wie etwa in ging oder in Gang.

D. Der Kehlkopfexplosionslaut, das Hamze. Wie schon oben (S. 648) erwähnt, kann die Stimme mit einer deutlich hörbaren Sprengung der Stimmritze einsetzen, die also vor der Stimme ertönt. Dieses dem K ähnliche Geräusch, (in verstärktem Maße können wir es uns durch einen Hustenstoß hörbar machen, der ja auch eine Sprengung eines festen Kehlkopfverschlusses darstellt), wird in der türkischen Sprache als besonderer Laut (Hamze) geschrieben und deutlich ausgesprochen. Bei den alten Griechen wurde dieser Laut durch den Spiritus lenis bezeichnet (ʼ).

2f) Die graphische Darstellung der Konsonanten. So wie man die durch die Vokalklänge erzeugten Erschütterungen der Luft aufgezeichnet hat, so hat man natürlich, zuerst mit sehr wenig, später mit gutem Erfolg auch die durch die Konsonanten erzeugten Erschütterungen in Kurven dargestellt. Es war zuerst Wendeler mit Hensens

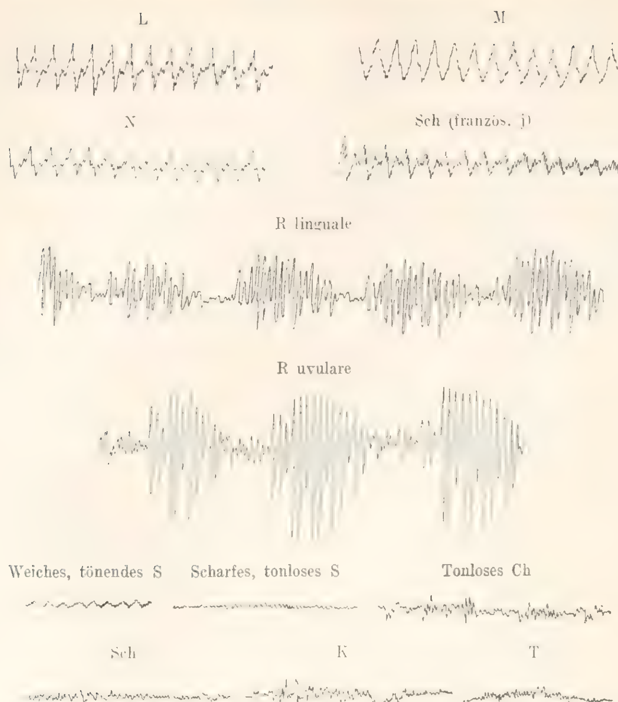


Fig. 44. Die ersten 7 Kurven von L, M, N, Sch (weich), R linguale und uvulare und S (weich) stammen von tönenden Konsonanten, daher die großen Ausschläge in den Kurven. Die letzten 5 (S, Ch, Sch, K, T) von tonlosen (scharfen, harten) nach Hermann. Zu beachten sind die kleinen Zäckchen bei den Zischlauten und der gewaltige Wechsel in der Stimmstärke bei dem R uvulare, die hier (vielfach ist es anders, vgl. Fig. 41) bedeutender sind, als bei dem R alveolare.

Sprachzeichner, so wie später Hermann und O. Weiß, welche tadellose Kurven lieferten. Einige Kurven von tönenden und tonlosen Konsonantenbildern mögen hier folgen. Man erkennt vielfach sehr hohe Töne, die sich durch die kleinen Zacken kenntlich machen, sowie die starken Schwankungen der Stimme in dem Zitterlaut R (R uvulare), je nachdem die Zunge der Stimme freien Ausweg gestattet oder ihn verhindert (Fig. 44).

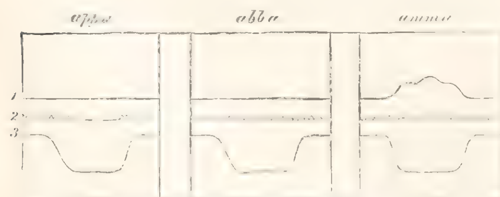


Fig. 45. Die Kurve 1 zeigt den Druck in der Nase an, der bei appa und abba = 0 ist. Denn das Gaumensegel ist geschlossen. In Kurve 2 ist verzeichnet das Verhalten des Kehlkopfes, der bei p schweigt (horizontale gerade Linie), bei b und m dagegen tönt (gezackte Linie). Kurve 3 gibt die Bewegung der Lippen an. Alle senkrecht untereinander gezeichneten Vorgänge erfolgen gleichzeitig, wie z. B. der Verschluß der Lippen und der während seiner Dauer stattfindende Luftaustritt aus der Nase bei offenem Gaumensegel in amma.

Lehrreich sind auch noch die Aufzeichnungen der gesamten Bewegungen der Lippen, des Unterkiefers, der Erzitterungen des Kehlkopfes usw., wie sie Rosapelli bei Marey und in außerordentlich vollkommener Weise Zwaardemaker, Seemann u. a. ausgeführt haben. Es seien, weil wir uns sonst zu sehr in Einzelheiten vertiefen müßten, nur hier drei Bilder nach Rosapelli wiedergegeben, welche durch die Aussprache der Silben appa, abba und amma gezeichnet wurden von den Lippen, dem Kehlkopf und dem Luftdruck in der Nase (s. Fig. 45).

3. Die Vereinigung der Laute zur Sprache. Nur mit wenigen Worten können wir dieses ungemein große Gebiet erledigen, da jede Sprache hierin ihre Eigenheiten besitzt. Hier sei folgendes hervorgehoben. Schon Kempelen hat betont, daß bei der Sprache zur Erzeugung bestimmter Klangbilder diejenigen Bewegungen bevorzugt werden, die uns auf dem leichtesten und kürzesten Wege zum Ziele, d. h. zur Erzeugung des betreffenden oder eines ihm möglichst ähnlichen Klangbildes führen. Wie sich an das I oder E durch geringe Hebung der Zunge das leicht zu bildende vordere Ch, dagegen an das A, O oder U das hintere Ch anschloß, so finden unzählige derartige Vorgänge bei der Berührung der verschiedenen Laute miteinander statt, denen allen das Prinzip der kleinsten Arbeit zugrunde liegt.

Die Träger der Stimme sind, wie schon gesagt, die Vokale, welche auch, wenn sich der Sprecher in zweckmäßiger Art mehr und mehr von dem Hörer entfernt, meistens ganz allein von dem Gesprochenen übrig bleiben (Helmholtz). Dabei zeigen auch die Vokale unter sich große Verschiedenheiten, indem unter gleichen Versuchsbedingungen das A am längsten bestehen bleibt; dann folgt das O, weiter E und I und zuletzt U, welches schon in einer Entfernung von 200 m seinen Vokalcharakter verändert, während ihn das A über 600 m beibehält (Wolf, Fetzer).

Beachtenswert ist weiter, daß während im Gesang ein Stimmträger (Vokal) möglichst auf einen Ton von bestimmter Höhe ausgehalten wird, in der Sprache der Stimmton selbst in einer einzigen Silbe, wie Martens mit Hensens Sprachzeichner gefunden hat, in weiten Grenzen regellos auf- und niederschwankt, was offenbar zu der Deutlichkeit des Vokalklanges wesentlich beiträgt. Dabei zeigt sich, daß der mittlere Sington im allgemeinen etwas (etwa zwei Intervalle) höher ist als der mittlere Sprechton. Die Zeitdauer, in welcher ein Vokal in unserer Sprache in einem Worte gesprochen wird, schwankt zwischen 0,038 bis 0,549 Sekunden und beträgt im Mittel 0,182 Sekunden. Auch die Länge der Konsonanten ist, wie begreiflich sehr verschieden, wenn auch durchweg viel kürzer. An phonographischen Kurven kann man, wenn die Geschwindigkeit der sich drehenden Walze bekannt ist, die Dauer der einzelnen Laute abzählen, die natürlich auch in der Dichtkunst von großer Wichtigkeit ist (Brücke).

Gleich der Höhe der Stimme in einem einzigen Vokale oder in verschiedenen Vokalen schwankt auch ihre Stärke. Das besonders Hervorzuhebende wird mit lauterer und meistens auch höherer Stimme gesprochen, als das Nebensächliche. Diese kurzdauernde Erhebung und Verstärkung der Stimme bezeichnen wir mit Akzent.

Wenn wir sprechen, strömt scheinbar andauernd, aber in Wirklichkeit doch mit kürzeren oder längeren Unterbrechungen der tönende Luftstrom aus unserem Munde. Spreche ich beispielsweise hintereinander die Lautverbindung aa oder aha, so schließt sich im ersten Falle der Kehlkopf hinter dem ersten a und öffnet sich zur Erzeugung des zweiten. Bei aha verengt er sich nur zwischen dem ersten und zweiten a. Aber diese Verschließung oder Verengung des Stimmapparates, die auch an anderen Stellen des Ansatzrohres stattfinden kann, umgrenzt einen einheitlichen, ununterbrochenen Exspirationshub und ein solcher wird nach Sievers als Silbe bezeichnet. Die beiden genannten Lautkombinationen (aa und aha) sind also zweisilbig.

Wie die Laute zu Silben, so setzen sich in ähnlicher Weise die Silben zu Worten zusammen. Auch auf sie wird die Stärke der Stimme verschieden ausgebreitet, meistens nur auf eine, häufig auch auf mehrere Silben (wie Váter, wúndervólles). Wenn man vom Satzakzent spricht, so versteht man darunter eine ausgebreitete, auf- und niedergehende, länger dauernde Erhebung, die, wenn der Satz zu Ende geht, an Stärke und Höhe herabsinkt, vielfach um eine Quart. Die Stimme wird dagegen gehoben, wenn wir den Hörer auf den Fortgang des Gedankens aufmerksam machen wollen oder wie in

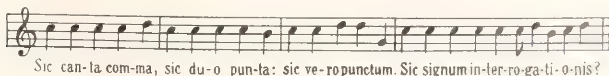


Fig. 46.

der Frage, die Fortsetzung unserer Rede von dem Hörer erbitten. Lehrreich ist in dieser Beziehung, wie in dem Gregorianischen Kirchengesang, dem der „cantus firmus“ der katholischen Kirche zugrunde liegt, diese Hebungen und Senkungen der Sprache durch Noten ausgedrückt sind (s. Fig. 46).

Literatur. **W. v. Kempelen**, *Mechanismus der menschlichen Sprache nebst Beschreibung einer sprechenden Maschine*, 1791. — **Johannes Müller**, *Handbuch der Physiologie*, Bd. 2, 1842. — **Derselbe**, *Ueber die Kompensation der physischen Kräfte usw.*, 1839. — **E. Harless**, *Stimme. In Wagners Handwörterbuch der Physiologie*, Bd. 4, 1853. — **E. Brücke**, *Grundzüge der Physiologie der Sprachlaute*, 1856. — **C. L. Merkel**, *Anatomie und Physiologie der menschlichen Stimm- und Sprachorgane*, 1863. — **Derselbe**, *Physiologie der menschlichen Sprache*, 1866. — **Donders**, *De physiol. d. spraakklanken*, 1872, und anderweitig. — **Helmholtz**, *Die Lehre von den Tonempfindungen*, 1877. — **M. Garcia**, *Beobachtungen über die menschliche Stimme*, 1878. — **P. Grützner**, *Physiologie der Stimme und Sprache in Hermanns Handbuch der Physiologie*, Bd. 1, 1879. — **V. Hensen** *und seine Schüler* **Martens** *und* **Wendeler** *im Archiv für Anatomie und Physiologie, Physiologische Abteilung*, 1879 *und Zeitschrift für Biologie*, Bd. 13, 23, 28. — **Pipping**, *Ebenda*, Bd. 27, 31. — **L. Hermann**, *Phonophotographische Untersuchungen. Pflügers Archiv*, Bd. 45, 47, 48, 53, 58, 59, 61, 83, 91. — **W. Nagel**, *im Handbuch der Physiologie*, Bd. 4, S. 691. — **H. Gutzmann**, *Physiologie der Stimme und Sprache*, 1909, *woselbst ausführliche Literatur*. — **J. R. Ewald**, *Die Physiologie des Kehlkopfes und der Luftröhre*, 1896. *In Heymanns Handbuch der Laryngologie usw.* — **E. Sievers**, *Grundzüge der Phonetik*, 1901. — **J. Poirot**, *Die Phonetik. Aus Handbuch der physiologischen Methodik von Tigerstedt*, Bd. 3, 1911. — **E. Barth**, *Physiologie, Pathologie und Hygiene der menschlichen Stimme*, 1911. — **F. Volbach**, *Die Kunst zu reden*, 1912. — **W. Brünings**, *Die direkte Laryngoskopie usw.*, 1910. — *„Archiv für Laryngoskopie“ von B. Fränkel*, Bd. 1 bis 26. — *Das Journal „Die Stimme“ von S. Flatau und K. Gast.* — **F. Semon**, *Forschungen und Erfahrungen*, Bd. 1, 1912. — **A. Denker und W. Brünnings**, *Lehrbuch der Krankheiten des Ohres und der Luftwege*, 1912. — **O. Weiss**, *Die Erzeugung von Geräuschen und Tönen. Aus H. Winterstein, Handbuch der vergleichenden Physiologie*, 1913. — **A. Musehold**, *Allgemeine Akustik und Mechanik des menschlichen Stimmorgans*, 1913.

P. v. Grützner.

Stinksteine.

Stinkkalk, Stinkdolomit, Stinkschiefer usw. sind Gesteine mit einem oft beträchtlichen Gehalt an von organischen Resten herrührendem Bitumen. Vgl. den Artikel „Bitumina“.

Stöchiometrie.

1. Einleitung. 2. Formeln. 3. Reaktionsgleichungen. 4. Chemische Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften. 5. Spezielle Stöchiometrie reiner Stoffe. Volumen, Wärmekapazität, Schmelzpunkt, Siedepunkt, Oberflächenspannung, Lichtbrechung, andere Eigenschaften. 6. Lösungen.

1. Einleitung. Stöchiometrie (Reihenmessung) ist eigentlich die Lehre von der Veränderung der Eigenschaften der Stoffe bei bestimmter Aenderung ihrer quantitativen und qualitativen Zusammensetzung, wie sie in den chemischen Formeln zum Ausdrucke gebracht wird. Es ist aber üblich geworden, auch die Lehre von der Zusammensetzung selbst, d. h. von der Aufstellung der chemischen Formeln auf Grund von Analysenergebnissen und charakteristischen Reaktionen, mit zur Stöchiometrie zu rechnen. Wir haben demnach hier mit einem in zwei deutlich verschiedene Unterkapitel zerlegbaren Thema zu tun und werden auch jedes von diesen beiden noch in Teile zu trennen haben.

Zur Aufstellung einer chemischen Formel ist eine Reihe von Aufgaben zu lösen. Die chemische Formel (vgl. den Artikel „Chemische Formeln“) ist ja bestimmt, die Natur des Stoffes nach verschiedenen Seiten hin abgrenzend zu charakterisieren; erstens bezüglich der Elemente, aus denen er hergestellt werden kann, und deren relativer Mengen (Bruttoformel), und sodann bezüglich seiner Reaktionsfähigkeit bei der Einwirkung verschiedener anderer Stoffe und seines Verhaltens bei bestimmten äußeren Umständen überhaupt (Konstitutionsformel). Außerdem pflegt man noch durch die Formel bei gewissen Rechnungen den Energieinhalt resp. die bei Umsetzungen auftretende Energietönung auszudrücken und auch, durch Zusatzsymbole, seinen Aggregatzustand sowie bei elektrolytischen Ionen die elektrische Ladung und die Zahl der Ladungseinheiten, mithin die Valenz eines Ions, anzudeuten. Wir werden uns wesentlich mit der Bruttoformel und ein wenig mit der Konstitutionsformel beschäftigen.

2. Formeln. Hat man durch Analyse die Zusammensetzung eines Stoffes nach Art und Mengenverhältnis der Elemente ermittelt, so ist zunächst die Bruttoformel aufzustellen. Hierzu ist die Umrechnung der relativen Gewichtsmengen (Prozentgehalte) auf molare Mengen nötig. Dies geschieht dadurch, daß man die relative Menge

jedes Elementes durch dessen Atomgewicht dividiert, so daß sich die der Mengeneinheit des Stoffes entsprechende relative Atomzahl ergibt. Wird jeder dieser Quotienten durch den kleinsten von ihnen dividiert, so resulzieren die Atomzahlen der gesuchten Formel. Es sei z. B. ein aus C, N, H, O bestehender Stoff mit folgendem Ergebnis bezüglich der relativen Mengen m (pro Gramm) analysiert worden.

Element	m
C	0,3139
H	0,01320
O	0,4888
N	0,1834

Daraus ergeben sich die pro Gramm vorhandenen atomaren Mengen zu 0,3139: $12{,}00_2$ = 0,02615 für C, 0,01320:1,008 = 0,01310 für H, 0,4888:16.000 = 0,03055 für O, 0,01834:14,004 = 0,01310 für N. Die Zahlen für N und H sind identisch und kleiner als die anderen; die Division ergibt $C_{1,995}N_1H_1O_{2,332}$. Der Koeffizient von C weicht nur so wenig von 2 ab, daß man, vorausgesetzt, daß die Experimentalkritik der ausgeführten Analyse das erlaubt, ihn gleich 2 annehmen darf. Bei O dagegen ist das ausgeschlossen. Da nun gebrochene Koeffizienten auf Grund des Atombegriffs ausgeschlossen sind, so müssen alle Koeffizienten der Formel mit einem (ganzzahligen) Faktor multipliziert werden, der die Zahl 2,332 in eine ganze Zahl verwandelt. Der kleinste mögliche Faktor ist 3, da 3.2,332 = 6,996, was innerhalb der Fehlergrenze gleich 7 ist. Demnach ist zu schreiben $C_6H_3N_3O_7$ als kleinste in diesem Falle mögliche Bruttoformel. Natürlich ist auch jedes ganzzahlige Multiplum dieser Formel möglich; die Entscheidung darüber, ob man zu schreiben hat $C_6H_3N_3O_7$ oder $(C_6H_3N_3O_7)_2$, $(C_6H_3N_3O_7)_{10}$ usw. ist aus anderen Beziehungen zu gewinnen. Ferner muß, besonders bei einigermaßen komplizierten Stoffen, die Frage nach der Reinheit des Stoffes und nach der Fehlergrenze der Analyse in Betracht gezogen werden. Wenn z. B. bei einem Kohlenwasserstoffe 84,96% C und 14,99% H gefunden werden, so erhält man 84,96:12,00 = 7,080 C und 14,99:1,008 = 14,87 H. Das Verhältnis beider Zahlen ist 14,87:7,080 = 2,103, und es werde angenommen, daß diese Zahl auf etwa 1‰ richtig sei. Dann ist die kleinste ganze Zahl, mit welcher multipliziert 2,103 eine Zahl ergibt, die von einer ganzen Zahl höchstens um 1‰ abweicht, gleich 19, weil 19.2,103 = 39,96, so daß also $C_{19}H_{38}$ zu setzen wäre. Indessen ist 20.21,03 = 42,06, was kaum mehr von einer runden Zahl abweicht und $C_{20}H_{42}$ ergeben würde. Eine Genauigkeit von 1‰ ist bei einer solchen Analyse, ganz abgesehen von der Frage, ob überhaupt ein hinreichend reiner Stoff vorliegt, nur bei sehr großer Sorgfalt zu erzielen, selbst wenn man beide Elemente direkt bestimmt und nicht etwa das eine als Differenz gegen 100% berechnet; und es kann demnach in einem solchen Falle ohne Hinzuziehung anderer Kriterien eine sichere Entscheidung nicht gefällt werden. Leichter ist eine solche meist dann zu treffen, wenn noch ein drittes Element (oder mehrere) in dem Objekt enthalten ist, besonders wenn dieses einen geringen Bruchteil ausmacht und genau bestimmbar ist, wie etwa ein Halogen. Z. B. wird man, wenn 79,10% C, 4,28% H und 16,70 %Cl gefunden worden sind, demnach also die atomaren Mengen sich verhalten wie $\frac{79{,}10}{12{,}00} : \frac{4{,}28}{1{,}08} : \frac{16{,}70}{35{,}45}$ = 13,98:9,02:1, unbedenklich $C_{14}H_9Cl$ annehmen, während, wenn kein Chlor zugegen wäre, bei einem Atomverhältnis von C:H = 13,98:9,02 = 1,55 es zweifelhaft sein könnte, ob man $C_{14}H_9$, oder etwa C_7H_{11} zu schreiben hätte, was einem Atomverhältnis von 1,57 entspricht.

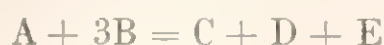
Die schon erwähnte Hinzuziehung weiterer Kriterien kann in praxi weitgehend dadurch ersetzt werden, daß man auf Grund der Darstellung des Stoffes aus bekannten anderen Stoffen schon vor der Analyse eine Vermutung über die Formel haben kann, und ohne dieses Mittel würde man in vielen Fällen komplizierter organischer Stoffe überhaupt hilflos sein. Andererseits kann natürlich eine solche vorgefaßte Meinung auch zu Irrtümern Veranlassung geben, und es ist das auch vorgekommen.

Ist die Bruttoformel gewonnen, so muß zunächst die Frage nach dem Molargewicht entschieden werden, da ja die Bruttoformel nur den kleinsten möglichen Wert angibt und statt ihrer eventuell ein ganzzahliges Multiplum zu wählen ist; hierfür kommen die im Artikel „Molekularlehre" angeführten Prinzipien in Betracht. Sodann muß versucht werden, durch Unterteilung der Elemente und ihrer Atomzahlen in einzelne Gruppen (Radikale) und eventuell durch räumlich verschiedene Anordnung dieser Gruppen in graphischer Darstellung die Zustandseigenschaften und das Verhalten des Stoffes bei Umwandlungen möglichst vollkommen auszudrücken, wobei die Fragen der Isomerie, Metamerie usw. zu entscheiden sind. Hierüber ist Näheres in dem Artikel „Chemische Formeln" zu finden.

Auch über die Valenz der einzelnen Elemente in der vorliegenden Verbindung ist Aufschluß zu suchen. Im allgemeinen läßt sich diese aus den Umsetzungsgleichungen der Reaktionen mit anderen Stoffen ableiten.

3. Reaktionsgleichungen. Die Aufgabe einer solchen Gleichung ist es, die in che-

mischem Maße, d. h. in Molen, ausgedrückten Mengenverhältnisse darzustellen, nach welchen die gegenseitige Einwirkung verschiedener Stoffe aufeinander erfolgt. Z. B. soll die Gleichung



$$A + 3B = C + D + E$$

besagen, daß aus einem Mol des Stoffes A und 3 Mol des Stoffes B je ein Mol der Stoffe C, D, E entsteht. Damit ist nicht gesagt, daß, wenn man diese Mengen von A und B zusammenbringt, diese unter allen Umständen völlig in die angegebenen Mengen von C, D, E übergehen und ihrerseits völlig verschwinden. Dies braucht nicht nur nicht der Fall zu sein, denn die Größe des Umsatzes wird durch äußere Umstände (Temperatur, Druck, Konzentration usw.) sowie die Affinitätsgrößen der einzelnen Stoffe bestimmt (vgl. den Artikel „Chemische Verwandtschaftslehre"), sondern kann auch nie eintreten, wie man annehmen muß, weil sonst thermodynamisch unmögliche Konsequenzen erfolgen müßten (vgl. den Artikel „Chemisches Gleichgewicht"). Die Gleichung soll vielmehr nur besagen, daß, wenn aus A und B die Stoffe C, D, E entstehen sollen, dabei zur Bildung je eines Moles C, D, E von A ein Mol und von B 3 Mol verbraucht werden müssen, wenn aber nur je $^1/_{10}$ Mol C, D, E gebildet wird, auch nur $^1/_{10}$ Mol A und $^3/_{10}$ Mol B verbraucht werden, sowie daß, wenn in dieser Reaktion 1 Mol C entsteht, zugleich auch je 1 Mol von D und E entstehen. Daß die Größe des Umsatzes u. a. von den Mengenverhältnissen abhängt, geht klar aus der Antwort auf die Frage hervor, was geschehen würde, wenn man 1 Mol A mit nur 2 Mol B zusammenbrächte. Daß in diesem Falle gar nichts erfolgen würde, kann man unmöglich annehmen, und es läßt sich ja das Eintreten der Umwandlung auch analytisch nachweisen. Es könnte dann natürlich von C, D und E nur eine kleinere Menge als 1 Mol gebildet werden, weil ja die Menge von B nicht ausreichen würde. Demnach muß also auch von A ein Rest bleiben. Das Endprodukt ist somit ein Gemisch von C, D, E, A und eventuell B. Das Vorliegen solcher Gleichgewichtserscheinungen wird in der Formel auch vielfach durch andere Symbole angedeutet, z. B.



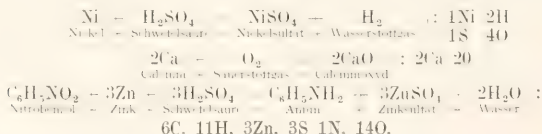
$$A + 3B \rightleftarrows C + D + E$$



$$A + 3B \rightleftarrows C + D + E$$

womit zugleich ausgedrückt ist, daß der Prozeß auch umgekehrt vor sich gehen kann, indem aus den Ausgangsstoffen C, D, E die Produkte A und B gebildet werden.

Weiterhin soll aber die Formel zum Ausdruck bringen, daß die Gewichtsmengen von A und B, die beim Umsatz verbraucht werden, zusammen gleich der Summe der entsprechenden Mengen von C, D, E sind; denn dies ist eine Konsequenz des Prinzips von der Erhaltung der Masse bei chemischen Reaktionen (vgl. den Artikel „Atomlehre"). Die Formel muß also auf beiden Seiten des Gleichheitszeichens für jedes Element in summa gleiche Koeffizienten haben; z. B.



$$Ni + H_2SO_4 = NiSO_4 + H_2 \quad : 1Ni\ 2H\ 1S\ 4O$$

Nickel + Schwefelsäure = Nickelsulfat + Wasserstoffgas

$$2Ca + O_2 = 2CaO \quad : 2Ca\ 2O$$

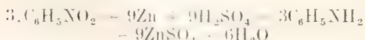
Calcium + Sauerstoffgas = Calciumoxyd

$$C_6H_5NO_2 + 3Zn + 3H_2SO_4 = C_6H_5NH_2 + 3ZnSO_4 + 2H_2O \quad :$$

Nitrobenzol + Zink + Schwefelsäure = Anilin + Zinksulfat + Wasser

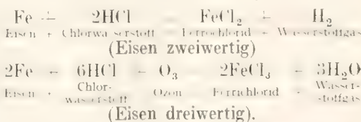
6C, 11H, 3Zn, 3S 1N, 14O.

Natürlich könnte in jedem dieser Fälle ein Multiplum der Koeffizienten geschrieben werden, aber dann müßte für jeden das gleiche gewählt werden, z. B.



$$3 . C_6H_5NO_2 + 9Zn + 9H_2SO_4 = 3C_6H_5NH_2 + 9ZnSO_4 + 6H_2O$$

wobei, wie üblich (vgl. den Artikel „Chemische Formeln"), die auf jeden ganzen Stoff bezüglichen Koeffizienten vor die Formel gestellt werden. ($3C_6H_5NO_3$ bedeutet drei Mol Nitrobenzol, $(C_6H_5NO_2)_3$ würde ein Mol eines Stoffes bedeuten, der aus drei Mol Nitrobenzol kondensiert ist.) Man schreibt stets die möglichst einfache Formel, ohne damit irgendeine Annahme über die wahren Molargewichte der reagierenden Stoffe zu verbinden, da über diese nur in speziellen Fällen (Gase, verdünnte Lösungen) etwas ausgesagt werden kann, und da hier, wo es sich nur um relative Zahlen handelt, das wahre Molargewicht nicht in Betracht kommt. Aus dem Koeffizienten, mit dem ein Stoff (ein Element) in einer Gleichung mindestens auftreten muß, kann man Schlüsse auf die Valenz ziehen, z. B.



$$Fe + 2HCl = FeCl_2 + H_2$$

Eisen + Chlorwasserstoff = Ferrochlorid + Wasserstoffgas

(Eisen zweiwertig)

$$2Fe + 6HCl + O_3 = 2FeCl_3 + 3H_2O$$

Eisen + Chlorwasserstoff + Ozon = Ferrichlorid + Wasserstoffgas

(Eisen dreiwertig).

Da gasförmiger Wasserstoff durch die

Formel H_2 ausgedrückt werden muß, nicht aber durch H, so wird, um die Formel $Fe + 3HCl = FeCl_3 + 3H$ zu vermeiden, hier alles verdoppelt (vgl. den Artikel „Molekularlehre“).

Wir wollen nun noch sehen, wie man aus Analysenresultaten die Formel ableitet. Dazu setzen wir die Kenntnis des Artikels „Atomlehre“ voraus. Ein Stoff bestehe pro Gramm aus a_1 Gramm des Elementes A, a_2 des Elementes B, a_3 des Elementes C, so daß $a_1 + a_2 + a_3 = 1$. Die Atomgewichte der drei Elemente seien M_1, M_2, M_3. Dann bedeuten

$$\nu_1 = \frac{a_1}{M_1} \qquad \nu_2 = \frac{a_2}{M_2} \qquad \nu_3 = \frac{a_3}{M_3}$$

die Anzahlen Atomgewichte pro Gramm Verbindung, also die Atomkoeffizienten der zu suchenden Formel, wenn der kleinste dieser Werte als Einheit gewählt wird (vgl. S. 668). Es müssen nun $\nu_1 : \nu_2$ und $\nu_1 : \nu_3$ im Verhältnis ganzer Zahlen stehen, und wir wollen beispielsweise annehmen, daß $\nu_2 = n\nu_1$, $\nu_3 = m\nu_1$ (z. B. CaS_2O_3). Dann folgt $1 = a_1 + a_2 + a_3 = \nu_1 M_1 + n\nu_1 M_2 + m\nu_1 M_3 = \nu_1 (M_1 + nM_2 + mM_3)$, und der Wert der Klammer ist gleich dem Molargewichte M der Verbindung. Also

$$\nu_1 = \frac{1}{M} = \frac{a_1}{M_1} \quad \text{und} \quad a_1 = \frac{M_1}{M}$$

entsprechend für die anderen Komponenten. $a_2 = \frac{n \cdot M_2}{M} \ldots$ Das heißt: der Gewichtsbruch (vgl. den Artikel „Chemische Einheiten“) jedes Elementes ist gleich dem Quotienten seines Atomgewichtes und des Molargewichtes der Verbindung.

Wenn man 12,00 g Schwefel (S = 32,03) und 20,00 g Eisen (Fe = 55,85) erhitzt hat, so findet man im Produkt 0,51 g Schwefel und 31,49 g Schwefeleisen, in diesen wiederum 11,49 g S und 20,00 g Fe. Dann ist der Gewichtsbruch des S im Schwefeleisen gleich $11{,}49 : 31{,}49 = 0{,}3642 = a_1$, der das Fe $a_2 = 0{,}6358$ g. Nun ist nach dem Vorstehenden $0{,}3642 : 32{,}03 = \nu_1$, $0{,}6358 : 55{,}85 = \nu_2$, also $\nu_1 = 0{,}01135$ $\nu_2 = 0{,}001135$; folglich ist $\nu_1 = \nu_2$ und die Formel der Verbindung lautet FeS. Man pflegt auch umgekehrt zu rechnen: Die 31,49 g der Verbindung enthalten $11{,}49 : 32{,}03 = 0{,}3582$ Mol S und $20{,}00 : 55{,}85 = 0{,}3582$ Mol Fe.

Durch die Reaktionsgleichung kann auch die bei der Umwandlung auftretende Energietönung ausgedrückt werden. Dann bedeuten die Formeln nicht die Stoffmengen, sondern deren Energiegehalt Näheres im Artikel „Chemische Energie“.

4. Chemische Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften. Wie schon oben erwähnt, soll die „Konstitutionsformel“ nicht nur das chemische Verhalten, sondern auch die anderen Eigenschaften des Stoffes soweit als möglich andeuten. Die Bruttoformel ist dazu nicht imstande, weil sie lediglich dasjenige Verhalten ausdrücken kann, welches nur durch Art und Menge der konstituierenden Elemente bestimmt wird, d. h. die additiven Eigenschaften (vgl. den Artikel „Chemische Eigenschaften“). Nun zwingen aber die Tatsachen der Isomerie, Metamerie usw. zu der Annahme des konstitutiven Einflusses, d. h. der Abhängigkeit von anderen Umständen als Art und Menge der Elemente, und dies wird einerseits in der Formel auszudrücken sein, andererseits sich dadurch zu erkennen geben, daß der gleichen Aenderung der Zusammensetzung in verschiedenen Fällen nicht völlig gleiche Eigenschaftsänderungen entsprechen. Die verschiedenen physikalischen Eigenschaften sind nun gegenüber solchen „konstitutiven“ Einflüssen verschieden empfindlich, und wir werden dies an Zahlenbeispielen sehen.

Bei anorganischen Stoffen treten additive Regelmäßigkeiten nicht so stark hervor wie bei Kohlenstoffderivaten; es scheint dies damit zusammenzuhängen, daß in diesen zwei Elemente von unveränderlicher Valenz, Kohlenstoff und Wasserstoff, stark zu prävalieren pflegen, während erfahrungsgemäß beim Vorhandensein von Elementen mit variabler Valenz, wie Sauerstoff, Stickstoff und sogar Chlor, sowie von Kohlenstoffdoppelbindungen, konstitutive Einflüsse deutlich hervortreten. Regelmäßigkeiten anorganischer Verbindungen werden in den Spezialartikeln besprochen; außerdem findet sich Material in den Artikeln „Atomlehre“ und „Molekularlehre“.

Die einfachsten Verhältnisse treffen wir bei Gasen und festen Stoffen, wo die Eigenschaften meist viel reiner additive Größen sind als bei Flüssigkeiten. Von festen Stoffen kommen nur wenige Eigenschaften in Betracht, weil für andere das Zahlenmaterial fehlt; die wichtigsten sind Dichte, spezifische Wärme und Schmelzpunkt.

Bei der Vergleichung ist zu bedenken, wie die Stoffmengen und die Eigenschaften gemessen werden sollen. Es ist ja nicht unbedingt nötig, in molaren Mengen zu rechnen, sondern man kann auch gleiche Gewichte oder gleiche Volumina wählen. Indessen pflegt man fast durchweg nur molare Mengen zu vergleichen, natürlich nur bei solchen Eigenschaften, die von der Stoffmenge abhängen (Quantitätsgrößen) nicht aber bei davon unabhängigen (Intensitätsgrößen, z. B. Druck).

Noch weitere Vereinfachungen treten in manchen Fällen ein, wenn man auch die zu vergleichenden Eigenschaften in einem bestimmten Maßsysteme ausdrückt, das man

als System der reduzierten Größen bezeichnen kann. Es wird dann nicht der in bestimmten absoluten Einheiten ausgedrückte Wert (eine benannte Zahl) gewählt, sondern eine Relativzahl, die man dadurch erhält, daß man diesen Wert durch einen bestimmten anderen Wert gleicher Dimension dividiert, welcher aus irgendeinem Grunde besondere Bedeutung hat. Z. B. wird das Volumen eines Stoffes dann nicht in ccm pro Gramm (spezifisches Volumen) oder pro Mol (Molarvolumen) gezählt, sondern als Bruchteil vom kritischen Volum des Stoffes ausgedrückt, ebenso Drucke und Temperaturen als Bruchteile der kritischen Größen (vgl. den Artikel „Aggregatzustände"). Wenn also das Volum von einem Mol (60 g) Essigsäure bei 20° gleich 57,2 ccm ist, so ergibt diese Zahl, durch das kritische Volumen (170,9 ccm) der Essigsäure dividiert, $\frac{57{,}2\ \mathrm{ccm}}{170{,}9\ \mathrm{ccm}} = 0{,}333$ als reduziertes Volumen bei 20°. Eine solche reduzierte Größe ist natürlich eine unbenannte Zahl.

Es leuchtet ein, daß man durch ein derartiges Verfahren die charakteristischen Eigentümlichkeiten eines Stoffes weitgehend eliminiert, und daß demnach der Vergleich solcher reduzierter Werte verschiedener Stoffe zu Formeln von einfacherer und allgemeinerer Gestalt führen wird, als der von nichtreduzierten. Die eigentliche Aufgabe der Stöchiometrie, die den einzelnen Stoff unter bestimmten Verhältnissen charakterisierenden Werte zu vergleichen, wird aber dadurch gerade überflüssig gemacht, und deswegen gehört eine derartige Behandlungsweise eigentlich nicht zu dem Thema der Stöchiometrie. Wohl aber gehört hierher ein gewisses Kompromißverfahren, welches darin besteht, daß man gewisse Eigenschaften bei gleichen reduzierten Werten gewisser anderer Eigenschaften vergleicht, z. B. Volumina bei gleichen reduzierten Temperaturen.

Von den drei Gruppen chemischer Eigenschaften; additiven, konstitutiven und kolligativen, kommen für die Stöchiometrie nur die beiden erstgenannten in Betracht, weil die kolligativen Eigenschaften nur von der Konzentration, nicht von der chemischen Natur bestimmt werden. Die additiven Eigenschaften hängen nur vom Charakter und den relativen Mengen der in einem Stoffe angenommenen Elemente ab, die konstitutiven dagegen sind diejenigen, welche sich dadurch allein nicht ausdrücken lassen und sich also dem einfachen additiven Schema nicht fügen, so daß man gezwungen ist, in die zu ihrer zahlenmäßigen Darstellung dienenden Gesetze weitere Rechnungsglieder aufzunehmen. Wie dies geschieht, werden wir später an einzelnen Fällen dartun. Zur Rechnung nach additiven Regeln genügt demnach die Kenntnis der Bruttoformel (s. o.), für konstitutiv beeinflußte dagegen braucht man die Konstitutions- oder Strukturformeln, resp. läßt sich umgekehrt bei deren Aufstellung durch das konstitutive Verhalten der Eigenschaften leiten. Rein additive Eigenschaften gibt es nicht, doch kommen manche diesem Verhalten nahe; als die wichtigste Aufgabe der Stöchiometrie muß aber zweifellos die Darstellung der konstitutiven Einflüsse gelten.

Die Form, in welcher man Eigenschaften von Verbindungen als Funktion der Eigenschaften der komponierenden Elemente darzustellen pflegt, ist die einer Summe von Einzelgliedern, deren jedes als ein Produkt von Menge und Eigenschaftswert eines Elementes erscheint. Die Mengen der Stoffe pflegt man in molarem Maße zu messen, so daß, wenn wir eine Eigenschaft E einer Verbindung vom Molargewicht M durch die Einzelwerte der Elemente $e_1, e_2 \ldots$, deren Atomgewichte $m_1, m_2 \ldots$ und Atomzahlen $n_1, n_2 \ldots$ darstellen wollen, die Formel

$$E . M = n_1 m_1 e_1 + n_2 m_2 e_2 \ldots$$

resultiert, in welcher $E, e_1, e_2 \ldots$ auf die Gewichtseinheit, also 1 g, bezogen sind und spezifische Werte heißen, während EM, $e_1 m_1$, $e_2 m_2 \ldots$ als molare resp. atomare Werte bezeichnet werden.

Es ist zu beachten, daß, wenn diese auf molare Mengen bezogene additive Regel zutrifft, eine völlig analoge auch für die spezifischen Größen gelten muß. Denn wir können schreiben

$$E = e_1 \cdot \frac{n_1 m_1}{M} + e_2 \cdot \frac{n_2 m_2}{M} \ldots$$

und hierin bedeuten die Brüche nichts anderes als die Gewichtsbrüche jedes Elementes in der Verbindung („Gewichtsprozente", wenn sie mit 100 multipliziert werden).

Wenn, beispielsweise, das Volum einer Verbindung von zwei Elementen betrachtet wird (eines Kohlenwasserstoffs), und wir den Gewichtsbruch des einen mit a bezeichnen, so wird

$$v = v_1 a + v_2 (1 - a).$$

Ein homologer Stoff derselben Reihe wird

$$v' = v_1 a' + v_2 (1 - a')$$

zeigen. Daraus folgt

$$\frac{v - v_2}{v' - v_2} = \frac{a}{a'}.$$

Beim Aufsteigen in einer homologen Reihe nähert sich der Quotient $\frac{a}{a'}$ der Einheit, d. h. die relativen Mengen der Elemente

ändern sich immer weniger; dann wird also der Unterschied von v und v' immer kleiner, und man kann sagen, daß beim Aufsteigen in einer homologen Reihe die Werte der spezifischen Volumina (oder einer anderen Eigenschaft, die von der Stoffmenge abhängt) einem konstanten Werte zustreben müssen.

Es folgt also aus diesen Gründen, daß, wenn die absolute Aenderung der Zusammensetzung relativ nur gering ist, dann auch die spezifischen Eigenschaftswerte nur wenig verändert werden. Wenn man z. B. vom Methylalkohol (CH_4O) zum Aethylalkohol (C_2H_6O) übergeht, so bedeutet dies folgende Veränderungen der relativen Gewichtsmengen der Elemente: C von 37,5% auf 52,2%, H von 12,5% auf 13,0%, O von 50,0% auf 34,8%. Dagegen betragen diese Veränderungen bei Octodecylalkohol ($C_{18}H_{38}O$) und Nonadecylalkohol ($C_{19}H_{40}O$) nur 80,0% bis 80,3% für C, 14,07% bis 14,08% für H und 5,93% bis 5,63% für O. Man wird demnach erwarten, daß die spezifischen Eigenschaftswerte der beiden niederen Alkohole stärker voneinander differieren als die der beiden hohen, und das entspricht auch den Tatsachen.

Uebrigens muß man sich stets gegenwärtig halten, daß die bei der Umrechnung von spezifischen Werten auf molare benutzten Molargewichte, wenigstens bei flüssigen und festen Stoffen, ein willkürliches System von Zahlen darstellen, da man ja die wahren Molargewichte dieser Aggregatzustände noch gar nicht kennt (vgl. den Artikel „Molekularlehre") und daß daher die Einführung dieses in sich allerdings ziemlich konsequenten Systems sowohl einfache Verhältnisse komplizieren wie auch komplizierte vereinfachen kann. Z. B. ist der Satz: die hohen Paraffine haben praktisch gleiche spezifische Wärme, eine mindestens so einfache Regel wie die: die Molarwärmen der hohen Paraffine unterscheiden sich für jede CH_2-Gruppe um konstante Beträge, und ebenso ist andererseits der Satz, daß die molare Verdampfungsentropie (vgl. den Artikel „Dämpfe") beim normalen Siedepunkt eine fast universelle Konstanz zeigt, der umständlichen Aufzählung der Zahlenwerte der spezifischen Verdampfungsentropieen und etwaiger für diese bestehender Regeln weit überlegen.

5. Spezielle Stöchiometrie reiner Stoffe. 5a) Volumen. Es ist üblich, die Volumina und nicht die Dichten zu vergleichen, und zwar die Molarvolumina. Für Gase sind hier wegen kolligativen Verhaltens keine stöchiometrischen Regeln aufstellbar, feste Stoffe pflegt man bei gleicher Temperatur, flüssige bei ihrem normalen Siedepunkte zu betrachten. Das Molarvolumen wird als Summe der Produkte von Atomvolumen und Atomzahl jedes komponierenden Elementes dargestellt, jedoch setzt man die Volumina nicht gleich denen der freien Elemente, was den Tatsachen nicht gerecht wird, sondern leitet diese Atomvolumina aus den Verbindungen ab. Z. B. ist das Molargewicht des festen Jodkaliums 166,0, sein spezifisches Gewicht 3,11, folglich das Molarvolumen 166,0:3,11 = 53,3, während für Kalium die entsprechenden Zahlen 39,1, 0,86, 45,3, für Jod 126,9, 4,94, 25,4 lauten; so daß 53,3 + 25,4 = 78,7 und nicht 53,3 ist. Indessen ist es auch mit solchen veränderten Werten der Atomvolumina nicht möglich gewesen, ein konsequentes additives Schema aufzustellen, und man hat daher zur Zerlegung in Teilvolumina gegriffen, die man als „Steren" bezeichnet hat. Es soll danach jedes Element in Verbindungen mit einem ganzzahligen Multiplum seiner Stere eintreten. Da man diese Zahlen beliebig klein annehmen kann, weil immer der ganzzahlige Faktor frei wählbar ist, so muß es natürlich möglich sein, ein solches System durchzuführen, aber natürlich hat dies wissenschaftlich keinen Wert, wenn die Wahl dieser Werte sich nicht noch anders begründen läßt. Erwähnenswert sind deswegen nur gewisse spezielle Regelmäßigkeiten, die sich auf Differenzen zwischen analogen Verbindungen beziehen. Die Molarvolumina von Halogensalzen haben z. B. folgende Werte (in ccm)

	Cl	Br	J
K	37,4	43,2	53,3
Na	29,6	34,2	40,9
Ag	25,8	29,1	41,5

Zwischen dem Chlorid und dem entsprechenden Jodid bestehen die Differenzen 15,9, 14,0, 15,7, die ungefähr einander gleich sind, man sagt deswegen, daß zwischen Chlorid und Jodid Isosterismus bestehe. Da auch die Differenz zwischen Bromid und Jodid in roher Annäherung konstant ist (10,1, 6,7, 12,4), so spricht man in solchen Fällen mehrerer Parallelreihen von Parallelosterismus (ebenso auch betreffs der Horizontalreihen). Man erkennt, daß es sich nur um Näherungsregeln handelt. Wir haben somit hier einen konstitutiven Einfluß anzunehmen, der noch nicht näher charakterisiert werden kann. Im übrigen darf nicht vergessen werden, daß man statt der Volumina auch die reziproken Werte, die Dichten resp. Konzentrationen, vergleichen könnte; auch dieses Verfahren hat bis jetzt einfache Regeln nicht ergeben.

Günstiger liegen die Verhältnisse für flüssige Stoffe. Hier ist es (vgl. oben) schon seit langer Zeit üblich, die Volumrelationen nicht auf gleiche Temperatur zu beziehen, sondern auf die Temperatur des normalen Siedepunktes unter Atmosphären-

druck, und die Wahl dieser Basis, für welche der Grund im Artikel „Thermometrie" mitgeteilt ist, hat eine unzweifelhafte Vereinfachung der Ergebnisse bewirkt, so daß additive Beziehungen viel reiner hervortreten als bei festen Stoffen und auch die konstitutiven Einflüsse relativ einfach darstellbar sind. Schon im Artikel „Molekularlehre" ist dies kurz erörtert worden, und indem wir auf die dort mitgeteilten Zahlenangaben verweisen, wollen wir hier nur einige der gefundenen Regeln anführen.

In homologen Reihen entspricht eine konstante Differenz der Zusammensetzung nahezu konstanter Aenderung des Molarvolumens (für CH_2 im Mittel 22 ccm).

Isomere Stoffe haben gleiches Molarvolumen (dies ist nur ein Spezialfall des vorstehenden Satzes).

Die Anfangsglieder homologer Reihen haben gewöhnlich etwas zu kleine Molarvolumina; andere konstitutive Einflüsse machen sich bei Vorhandensein von Doppelbindungen und Ringschlüssen geltend.

Man kann die konstitutiven Einflüsse weitgehend berücksichtigen und die Molarvolumina beim Siedepunkte auf einige Prozent genau berechnen, wenn man die folgenden, schon (vgl. den Artikel „Molekularlehre") mitgeteilten, Zahlen für Elemente und Bindungsarten benutzt:

Element (Radikal)	ccm	Element (Radikal)	ccm
C	10,4	S	23,5
H	5,22	N	7,0
O (Carbonyl)	12,2	CN	30
O (Aether)	7,8	NO_2	37,0
Cl	22,8	P- dreiwertig	26
Br	28,0	P- fünfwertig	19
J	38,0	Aethylenbindung	1,5

So findet man für Benzol 6 . (10,4 + 5,2) + 3 . 1,5 = 98,1 statt 95,7, für Diallyl 6 . 10,4 + 10 . 5,5 + 1,5 = 118,9 statt 125,8, für Chloroform 84,0 statt 84,5.

Eine andere Volumgröße, die aus der van der Waalsschen Kontinuitätstheorie (vgl. den Artikel „Aggregatzustände") bekannte Größe des Eigenvolums der Molekel b, zeigt in manchen Fällen, z. B. bei Estern, additives Verhalten, auch für HCl, H_2O und einige andere Stoffe sind die gefundenen Zahlen praktisch gleich der Summe der Atomwerte. Doch sind hierfür noch keine Regeln ausgearbeitet worden.

5b) Wärmekapazität. Feste Stoffe. Hierfür liegt, abgesehen von den anorganischen Substanzen, die schon im Artikel „Molekularlehre" besprochen wurden, nicht viel Material vor. Reine Additivität besteht nicht, weder für Elemente, noch für Radikale, besonders ist beim Vorhandensein von Elementen mit variabler Valenz, Sauerstoff, Stickstoff, Halogenen, von Doppelbindungen und Kohlenstoffringen konstitutiver Einfluß deutlich erkennbar. Setzt man für Kohlenstoff den für flüssige Stoffe geltenden Wert, etwa 2,0 Cal pro Grad und Atomgewicht, für Wasserstoff ebenso 2,4, für Sauerstoff 4,2, so berechnet sich z. B. für festes Benzol die Molarwärme zu 26, während 31 gefunden wurde, für feste Ameisensäure 20 gegenüber dem gefundenen Werte 15, usf. Weiteres Material im Artikel „Molekularlehre". Bei tiefen Temperaturen passieren alle spezifischen Wärmen ein Gebiet starker Temperaturabhängigkeit (vgl. darüber den Artikel „Kalorimetrie").

Flüssigkeiten. In homologen organischen Serien bestehen wie beim Volum ziemlich konstante Differenzen. Die Paraffine zeigen folgende Werte der Molarwärmen W bei gewöhnlicher Temperatur, S ist die spezifische Wärme (vgl. den Artikel „Kalorimetrie").

	W	Diff.	S	Diff.
C_6H_{14}	45,3		0,527	
		5,4		0,020
C_7H_{16}	50,7		0,507	
		6,8		0,002
C_8H_{18}	57,5		0,505	
		6,9		0,002
C_9H_{20}	64,4		0,503	
		6,9		0,002
$C_{10}H_{22}$	71,3		0,501	
		6,8		0,001
$C_{11}H_{24}$	78,1		0,500	
		6,9		0,001
$C_{12}H_{26}$	85,0		0,499	
		6,6		0,001
$C_{13}H_{28}$	91,6		0,498	
		6,9		0,001
$C_{14}H_{30}$	98,5		0,497	
		6,8		0,001
$C_{15}H_{32}$	105,3		0,496	
		6.7		0,001
$C_{16}H_{34}$	112,0		0,495	

Man erkennt, daß die Gruppe CH_2 hier ungefähr die gleiche Wärmemenge verlangt wie ein freies Element mit normaler Molarwärme (ca. 6). Bei Alkoholen am Siedepunkt beträgt die Differenz für CH_2 im Mittel 10,0, bei Estern ebenso etwa 9,7, bei Fettsäuren desgl. etwa 10 bis 12. Die Molarwärme läßt sich im allgemeinen additiv berechnen, wenn man 2,0 für C, 2,4 für H, 4,2 für O setzt, doch sind die konstitutiven Einflüsse auch hier zweifellos vorhanden und verlangen wie in den bisher erwähnten Fällen Zusatzglieder.

Bei Flüssigkeiten ist im allgemeinen die Temperaturabhängigkeit ziemlich groß, so daß ein weniger einfaches Verhalten bei gleicher Temperatur zu erwarten ist. Anorganische flüssige Stoffe sind nicht in hinreichend großer Zahl gemessen, um Regeln erkennen zu lassen; es genüge, für sie einige Beispiele zu geben. Setzt man die Atomwärme für Sauerstoff gleich 4,2, für Schwefel gleich 5,2, für Wasserstoff gleich 6, für Chlor gleich 8, für Zinn gleich 6,5, für Phosphor gleich 5.2, so erhält man folgende Tabelle von gefundenen und berechneten Molarwärmen bei Zimmertemperatur:

Stoff	gef.	ber.
SO_2	13,4	20,4
S_2Cl_2	27,4	26,4
PCl_3	27,2	20,7
H_2SO_4	33,3	28
$SnCl_4$	22,6	38,5

Die Additivität besteht also keineswegs. Berechnet man (vgl. oben S. 674) die spezifischen Wärmen in gleicher Weise, so ergibt sich für S_2Cl_2 das aus 0,47% S (spez. Wärme 0,16) und 0,53% Cl (spez. Wärme 0,226) besteht,

$$0{,}47 \,.\, 0{,}16 + 0{,}53 \,.\, 0{,}226 = 0{,}195,$$

während 0,202 gefunden ist. Analog ergeben PCl_3 0,216 (gef. 0,199), $SnCl_4$ 0,148 (gef. 0,140), für H_2SO_4 0,346 (gef. 0,345), für SO_2 0,21 (gef. 0,32). Diese Berechnung stimmt also ebensogut wie die der Molarwärmen (SO_2 weicht in beiden Fällen gleich stark ab). Wir haben hier wieder einen der S. 672 besprochenen Additivitätsfälle, in denen die molaren Größen sich nicht einfacher verhalten als die spezifischen. Genau dasselbe Resultat liefern auch die festen Stoffe.

Isomere haben nur dann gleiche Molarwärme, wenn sie nahe verwandt sind.

Auch betreffs der Molarwärme ist vorgeschlagen worden, die Vergleichung bei gleichen Bruchteilen der kritischen Temperatur (s. oben) vorzunehmen, z. B. etwa bei der normalen Siedetemperatur; dies verspricht allerdings einfachere Ergebnisse, jedoch lassen sich die Rechnungen zurzeit nur vereinzelt durchführen.

5c) **Schmelzpunkt.** Die stöchiometrischen Beziehungen sind hier sehr wenig deutlich. In homologen Reihen tritt bisweilen eine eigentümliche Alternation auf, indem die Schmelzpunkte der Glieder mit ungerader Anzahl von Kohlenstoffatomen tiefer liegen als die der nächsthöheren Glieder mit gerader Zahl. Die normalen Fettsäuren zeigen dies deutlich.

Formel	Schmelzpunkt
$HCOOH$	$+8^0$
CH_3COOH	$+16{,}7^0$
C_2H_5COOH	$<-21^0$
C_3H_7COOH	0^0
C_4H_9COOH	$<-16^0$
$C_5H_{11}COOH$	2^0
$C_6H_{13}COOH$	$10{,}5^0$
$C_7H_{15}COOH$	$+16^0$
$C_8H_{17}COOH$	$+12^0$
$C_9H_{19}COOH$	$+30^0$

Dagegen findet in anderen Fällen regelmäßiges Ansteigen statt, z. B. bei den Paraffinen.

Formel	Schmelzpunkt	Diff.
CH_4	−186	
C_2H_6	−172	14
C_4H_{10}	135	2.18,5
C_9H_{20}	− 51	5.17
$C_{10}H_{22}$	− 32	19
$C_{11}H_{24}$	− 26	6
$C_{12}H_{26}$	− 12	14
$C_{13}H_{28}$	− 6	6
$C_{14}H_{30}$	− 5,5	11,5
$C_{15}H_{32}$	− 10	4,5
$C_{16}H_{34}$	18	8
$C_{17}H_{36}$	22,5	4,5
$C_{18}H_{38}$	28	5,5
$C_{19}H_{40}$	32	4
$C_{20}H_{42}$	36,7	4,7
$C_{21}H_{14}$	40,4	3,7
$C_{22}H_{46}$	44,4	4,0
$C_{23}H_{48}$	47,7	3,3
$C_{24}H_{50}$	51,1	3,4

Man erkennt ein deutliches Abnehmen der Differenz von den Anfangsgliedern zu den höheren, wie vielfach bei anderen Eigenschaften.

Von weiteren Regeln sei erwähnt, da Substitution von H durch O oder Halogene den Schmelzpunkt meist erhöht, andererseits bei Substitution von H, das an O, N, S gebunden ist, durch CH_3 Erniedrigung einzutreten pflegt, und daß von Isomeren dasjenige höher zu schmelzen pflegt, dem man stärkere Verzweigung der Nebenketten oder größere Symmetrie der Formel zuschreibt.

Formel	Schmelzpunkt
CH_4	−186
CH_3Cl	−104
CH_2Cl_2	97
$CHCl_3$	− 62
CCl_4	23
CH_3COOH	+ 16,7
$CH_2ClCOOH$	+ 62
$CHCl_2COOH$	< 0
CCl_3COOH	+ 52
CCl_3CONH_2	154
$CCl_3CONHCH_3$	91
$CO(NH_2)_2$	132
$CO(NH_2)NHCH_3$	78
n-$C_{11}H_{10}$	−135
iso-$C_{11}H_{10}$	145
$(C_2H_5CHCOOH)_2$	+190
$nCH_3CHCOOH\,n$	
$nC_3H_7CHCOOHn$	+174

Quantitative Beziehungen sind noch nicht gefunden.

5d) **Siedepunkt.** Bei den Siedepunkten unter Atmosphärendruck finden wir stöchiometrisch gut ausgeprägte Regelmäßigkeiten sowohl von fast rein additivem Charakter wie mit konstitutivem Einflusse. In manchen homologen Reihen (s. den Artikel „Organische Chemie") pflegt der Siedepunkt

mit jeder CH_2-Gruppe um ungefähr gleiche Beträge zu steigen, wie z. B. folgende Reihen für normale Aldehyde und Benzole zeigen.

Stoff	Siedepunkt	Diff.
CH_3CHO	20,8	
C_2H_5CHO	49	28,2
C_3H_7CHO	75	26
C_4H_9CHO	10,3	28
$C_5H_{11}CHO$	12,8	25
$C_6H_{13}CHO$	15,5	27
C_6C_6	79,5	27
$C_6H_5CH_3$	112	(31,5)
$C_6H_5C_2H_5$	133	21
$C_6H_5C_3H_7$	153	20
$C_6H_5C_5H_{11}$	193	2,20
$C_6H_4(CH_3)_2$	140	
$C_6H_4CH_3C_2H_5$	159	19
$C_6H_4CH_3C_3H_7$	178	19
$C_6H_4CH_3C_5H_{11}$	213	2.17,5

In anderen wieder steigt der Siedepunkt zwar mit der Zahl der Methylengruppen an, jedoch mit immer kleinerer absoluter Differenz. Dies zeigen deutlich die normalen Paraffine.

Stoff	Siedepunkt	Diff.
CH_4	160	
C_2H_6	— 84	76
C_3H_8	— 45	39
C_4H_{10}	+ 0,6	45,6
C_5H_{12}	38	37
C_6H_{14}	71	33
C_7H_{16}	98,4	27,4
C_8H_{18}	125,5	27,1
C_9H_{20}	149,5	24
$C_{10}H_{22}$	173	23,5
$C_{11}H_{24}$	194,5	21,5
$C_{12}H_{26}$	214	19,5
$C_{13}H_{28}$	234	20
$C_{14}H_{30}$	252,5	18,5
$C_{15}H_{32}$	270,5	18
$C_{16}H_{34}$	287,5	17
$C_{17}H_{36}$	303	15,5
$C_{18}H_{38}$	317	14
$C_{19}H_{40}$	330	13

Bei isomeren und metameren Stoffen tritt der Konstitutionseinfluß gleichfalls deutlich hervor. Hierfür gilt oft die qualitative Regel, daß der Siedepunkt um so höher liegt, je gerader und weniger verzweigt die dem Stoffe zugeschriebene Strukturformel ist. Z. B.:

Butan:	
$CH_3CH_2CH_2CH_3$	0,6
$CH_3CH(CH_3)_2$	17
Pentan:	
$CH_3CH_2CH_2CH_2CH_3$	38
$CH_3CH_2CH(CH_3)_2$	30
$C(CH_3)_4$	10
Hexan:	
$CH_3CH_2CH_2CH_2CH_2CH_3$	71
$CH_3CH_2CH_2CH(CH_3)_2$	62
$(CH_3)_2CHCH(CH_3)_2$	+ 58
$CH_3CH(CH_2CH_3)_2$	
$(CH_3)_3C(CH_2CH_3)$	45
Propylalkohol:	
$CH_3CH_2CH_2OH$	97,4
$(CH_3)_2CHOH$	+ 82,8
Butylalkohol:	
$CH_3CH_2CH_2CH_2OH$	−117
$(CH_3)CHCH_2OH$	+ 108,4
$\frac{CH_3}{HO}>CHCH_2CH_3$	+ 99
$(CH_3)_3.OH$	+ 83
Amylalkohole:	
$CH_3CH_2CH_2CH_2CH_2OH$	137
$(CH_3)_2CHCH_2CH_2OH$	131,2
$\frac{CH_3}{C_2H_5}>CHCH_2OH$	127
$(C_2H_5)_2CHOH$	116
$\frac{CH_3}{n\text{-}C_3H_7}>CHOH$	118
$\frac{CH_3}{iso\text{-}C_3H_7}>CHOH$	112,5
$\frac{C_2H_5}{(CH_3)_2}>COH$	102,5

Allgemein jedoch gilt diese Regel nicht. Für metamere Stoffe bilden die Fettsäureester gutes Material. Die Siedepunkte zeigen im allgemeinen kleine Differenzen von bei verwandten Serien ungefähr gleicher Größe.

Formiate	
Methylformiat	32,5
Aethylformiat	55
Propylformiat	81
Butylformiat	106,9
Amylformiat	130,4
Hexylformiat	153,6
Heptylformiat	176,7
Oktylformiat	198,1
Methylester	
Methylformiat	32,5
Methylacetat	57,3
Methylpropionat	79,5
Methylbutyrat	202,3
Methylvalerat	127,3
Methylcapronat	149,6
Methylcaprinat	171,2
Methyloktylat	192,9

Relativ klein sind auch die Unterschiede bei Benzolkohlenwasserstoffen. Die vier Stoffe der Formel C_8H_{10} zeigen

o-$C_6H_4(CH_3)_2$	141
m-$C_6H_4(CH_3)_2$	139,2
p-$C_6H_4(CH_3)_2$	137,2
$C_6H_5C_2H_5$	136

die Cumole C_9H_{12}

1, 2, 3-$C_6H_3(CH_3)_3$	169
1, 3, 4-$C_6H_3(CH_3)_3$	166
1, 2, 6-$C_6H_3(CH_3)_3$	163
o-$C_6H_4<\frac{CH_3}{C_2H_5}$	160
m-$C_6H_4<\frac{CH_3}{C_2H_5}$	150
p-$C_6H_4<\frac{CH_3}{C_2H_5}$	161
n-C_3H_7 C_6H_5	157
iso-$C_3H—_7C_6H_5$	153

Die Regelmäßigkeiten der Substitution von Wasserstoff lassen sich kurz so zusammenfassen (zu CH_3 vgl. oben S. 675). Chlor erhöht meist den Siedepunkt, jedoch

schwächer als proportional der Zahl der Chloratome, z. B.

		Diff.
CH_4	160	
		136
CH_3Cl	24,1	
		65,7
CH_2Cl_2	+ 41,6	
		20
$CHCl_3$	+ 61,2	
		15,6
CCl_4	+ 76,8	

Es kommt aber auch vor, daß durch diese Substitution der Siedepunkt erniedrigt wird. Brom erhöht stärker als Chlor, Jod stärker als Brom. Hydroxyl erhöht stark, um mehr als 100⁰, Carboxyl noch stärker, um rund 150⁰.

C_6H_6	79,5
C_6H_5OH	183
C_6H_5COOH	250
C_2H_6	− 84
C_2H_5OH	+ 78,4
CH_3COOH	+ 118,5

Doppelbindung bewirkt oft, z. B. bei Kohlenwasserstoffen, Alkoholen, Säuren, Estern, keine merkliche Aenderung, in anderen Fällen wieder starke Depression. Die Gruppen $COCH_3$, $COOCH_3$ und COCl erhöhen gleich stark, um ca. 100⁰.

5e) Oberflächenspannung. Für diese Größe lassen sich bis jetzt nur qualitative Regeln geben. Die bisher gemachten Versuche legen sowohl die Oberflächenspannung, wie die Steighöhe und auch mit dem Molargewicht kombinierte Ableitungen dieser Größen zugrunde. Bei organischen Stoffen kann man qualitativ sagen, daß die Substitution von C, O, Cl, Br, J für H die Oberflächenspannung erhöht, und daß Isomerie nahezu keinen Einfuß hat. R. Schiff verglich bei den Siedepunkten, weil diese nahezu „korrespondierende" Temperaturen sind, und wählte als charakteristische Größe die durch das Molargewicht dividierte Oberflächenspannung, die als „Zahl der gehobenen Molekeln" bezeichnet wird. Er fand, daß diese Größe sich im allgemeinen additiv berechnen läßt, jedoch mit unzweifelhaften konstitutiven Einflüssen, indem Ersatz von 2 H durch C, von 3 H durch O, von 7 H durch Cl usw. die Zahl nicht verändert. Jedoch sind diese „Wasserstoffäquivalente" nicht etwa konstante Zahlen, sondern für jeden Stoff verschieden, und die Abhängigkeit der Zahl gehobener Molekeln n von ihnen folgt der Formel

$$\log(1000\,n) = 2{,}8155 - 0{,}00728\,x - \log x$$

wo x die Summe der Wasserstoffäquivalente bedeutet. Diese beträgt also z. B. bei $C_6H_4CH_3Cl$ $x = 7 + 2 . 7 + 7 . 1 = 28$, für CH_3COOH $x = 4 + 2 . 2 + 2 . 3 = 14$ usf.

Weiter ist die Stöchiometrie der Oberflächenspannung noch nicht gekommen (vgl. über molare Oberflächenenergie den Artikel „Molekularlehre").

5f) Lichtbrechung. Die stöchiometrischen Regelmäßigkeiten der Refraktion erstrecken sich wesentlich auf organische Stoffe, da sie eine so genau meßbare und von der Konstitution abhängige Eigenschaft ist, daß das Material der anorganischen Stoffe verhältnismäßig wenig erkennen läßt. Als Maß pflegt man fast allgemein das Lorenz-Lorentzsche Refraktionsäquivalent R zu benutzen, das den Brechungsindex n mit der Dichte d nach

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\,\frac{1}{d} = R$$

verknüpft. Diese Größe ist aus entsprechenden Partialwerten der Elemente additiv berechenbar, jedoch mit starker konstitutiver Beeinflussung, der man wie bei anderen Eigenschaften dadurch Rechnung zu tragen pflegt, daß man für bestimmte Bindungsweise der Atome in der Molekel weitere additive Glieder zufügt. Die wichtigsten dieser Konstanten (für flüssige Stoffe) sind nach neuesten Berechnungen in folgender Tabelle zusammengefaßt, wobei $H\alpha$, D und $H\beta$ die Spektralfarben angeben, für welche n gilt. $H\alpha$ ist die rote Linie des Wasserstofflichtes (Wellenlänge $\lambda = 656{,}3\ \mu\mu$), $H\beta$ die grüne ($\lambda = 486{,}1\ \mu\mu$), D die gelbe Natriumlinie ($\lambda = 589{,}3\ \mu\mu$). Die Zahlen beziehen sich auf je ein Mol (z. B. 12 g Kohlenstoff usw.).

Radikal	$H\alpha$	D	$H\beta$
CH_2	4,598	4,618	4,668
C	2,413	2,418	2,438
H	1,092	1,100	1,115
O(Carbonyl)	2,198	2,211	2,247
O(Aether)	1,639	1,643	1,649
O (Hydroxyl)	1,522	1,525	1,531
Cl	5,933	5,967	6,043
Br	8,803	8,865	8,999
J	13,757	13,900	14,224
Aethylenbindung	1,686	1,733	1,824
Acetylenbindung	2,328	2,398	2,506

Für Cl in Säurechloriden gelten die Werte 6,310, 6,336, 6,430. Stickstoff ist stark variabel, zwischen 2,8 und 9, in Aminen hat er etwa 2,5 bis 4,0, in Nitrokörpern 6,5, in Imiden ca. 5. Schwefel zeigt 4 bis 9. Isomere haben oft, aber nicht allgemein, gleiche Werte von R.

Hiermit ist jedoch die Reihe der konstitutiven Effekte keineswegs abgetan.

Die Berechnung sei an folgenden Beispielen dargetan.

Benzol. Bei 20⁰ ist $n_D = 1{,}50144$, $d_4^{20} = 0{,}8791$, also

$$R = 78{,}05\,\frac{1{,}50144^2 - 1}{1{,}50144^2 + 2}\,\frac{1}{0{,}8791} = 26{,}21.$$

Berechnen würde sich

$R = 6 . 2{,}418 + 6 . 1{,}100 + 3 . 1{,}733 = 26{,}307$.

Aceton. Bei 19,4⁰ ist $n_D = 1{,}35886$, $d_4^{19,4} = 0{,}7912$, also

$$R = \frac{1,35886^2 - 1}{1,35886^2 + 2} \cdot \frac{1}{0,7912} \cdot 58,05 = 16,142.$$

Die Berechnung ergibt

$R = 3 \,.\, 2,418 + 6 \,.\, 1,110 + 2,211 = 16,125.$

Allylbromid. Bei 20⁰ ist $n_D = 1,46545$, $d_4^{20} = 1,3980$, also

$$R = \frac{1,46545^2 - 1}{1,46545^2 + 2} \cdot \frac{1}{1,3980} \cdot 121,03 = 24,152.$$

Die Berechnung ergibt

$R = 3 \,.\, 2,418 + 5 \,.\, 1,110 + 8,865 + 1,733 = 23,402.$

Es ist noch zu beachten, daß derartige Berechnungen sich auch mit der Gladstone-Landoltschen Formel

$$R = \frac{n-1}{d} \,.\, M$$

durchführen lassen. Im Artikel „Molekularlehre" sind schon solche Rechnungen mitgeteilt worden.

Dem Umstande entsprechend, daß die Lichtbrechung wesentlich eine Eigenschaft des Elementes ist, tritt bei den Refraktionsäquivalenten die Additivität stärker hervor als bei anderen Eigenschaften; daß man unzweifelhafte konstitutive Einflüsse nachweisen kann, liegt zum Teil daran, daß die Lichtbrechung sich mit besonders großer Genauigkeit messen läßt.

Für Näherungsrechnungen genügen deshalb folgende Atomkonstante (D-Linie) I für die Lorenz-Lorentzsche, II für die Gladstone-Landoltsche Formel.

	I	II
H	1,1	1,7
O	1,8	3,3
C	2,4	4,3
Cl	5,9	9,1
S	7,7	10,5
N	4	6

Z. B. zeigt HCl bei 10,5⁰ im flüssigen Zustande $n = 1,254$, $d = 0,85$, also

$$\frac{1,254^2 - 1}{1,254^2 + 2} \cdot \frac{36,5}{0,85} = 6,9 \quad \text{ber. } 1,1 + 5,9 = 7,6$$

und

$$0,254 \,.\, \frac{36,5}{0,85} = 10,9 \qquad \text{ber. } 1,7 + 9,1 = 10,8.$$

Von festen Stoffen kommen fast nur Kristalle in Betracht; da bei diesen die Achsenrichtung komplizierend hinzutreten kann, so sollen sie hier nicht besprochen werden.

Gase zeigen ungefähr additiven Charakter. Aus den Elementen leiten sich folgende Werte der Refraktionsäquivalente pro Atom ab (D-Linie).

	I	II
H	1,1	1,6
O	2,1	3,1
N	2,2	3,3
Cl	5,7	8,6
Br	8,5	12,7
S	8,3	12,5

So finden wir z. B. für H_2S nach II

$R = 2 \,.\, 1,6 + 12,5 = 15,2$, gef. 14,9

für HBr

$R = 12,5 + 1,6 = 14,1$, gef. 12,8

für SO_3

$R = 12,5 + 3 \,.\, 3,1 = 21,8$, gef. 16,5.

Kohlenstoff, als Differenz aus seinen Verbindungen berechnet, ergibt etwa 3,1 nach I, 4,7 nach II.

5g) Andere Eigenschaften. Gewisse Regelmäßigkeiten derselben Art, wie die bisher besprochenen Eigenschaften zeigen, finden sich auch bei allen anderen. Am einfachsten verhalten sich die Verbrennungswärmen (vgl. den Artikel „Thermochemie") organischer Stoffe, welche ungefähr dasselbe Bild wie die Volumgrößen bieten. Etwa analog der Lichtbrechung verhält sich die elektromagnetische Drehung der Polarisationsebene des Lichtes. Ueber Bildungswärme, Kompressibilität und Viskosität läßt sich bis jetzt noch nicht viel aussagen. Bei der Kompressibilität erklärt sich dies aus dem geringen Umfange des Zahlenmaterials, die Viskosität dagegen ist eine Eigenschaft von enormer konstitutiver Empfindlichkeit, so daß sie selbst bei sehr nahe verwandten Stoffen sehr stark differiert, und es ist deshalb noch nicht gelungen, eine Stöchiometrie für sie aufzustellen.

6. Lösungen. Die stöchiometrisch bis jetzt so verwertbaren Eigenschaften von flüssigen Lösungen sind: Dichte, spezifische Wärme, Kapillarität, Kompressibilität, Viskosität. Es handelt sich meist um verdünnte Lösungen und um solche, in denen das Lösungsmittel Wasser ist. Andere Eigenschaften, wie Siedepunkt und Erstarrungspunkt, sind bei verdünnten Lösungen rein kolligativ und bringen also die stoffliche Natur der Substanzen nicht zur Erscheinung. Feste Lösungen bieten noch wenig Material, Gasgemische verhalten sich, falls keine chemischen Reaktionen eintreten, rein additiv. Wir beschränken uns hier auf verdünnte Lösungen, und verweisen auf den Artikel „Lösungen".

Dichte. Bei verdünnten Lösungen ist das Volum nicht einfach gleich der Summe der Komponentenvolumina, ebensowenig die Dichte. Es treten sowohl Kontraktionen wie Dilatationen auf. Die wichtigste Regel, welche man gefunden hat, bezieht sich auf die Dichten wässeriger Salzlösungen und lautet dahin, daß bei gleicher Temperatur

(Zimmertemperatur) und gleicher Konzentration die Unterschiede der Dichten für verschiedene Salze gleichen Typs nahezu konstant sind. Diese Differenzen, die man als „Moduln" bezeichnet, entsprechen also den Volumsteren der reinen Stoffe (s. S. 673). Die Konzentration ist hierbei in Aequivalenten pro Liter ausgedrückt. In der folgenden Tabelle für normale Konzentration bedeuten die Zahlen die Dichten (Wasser = 1) bei 18°.

KCl	1,0449	KNO_3	1,0602
NaCl	1,0391	$NaNO_3$	1,0544
Diff.	0,0058	Diff.	0,0058

		Diff.
$\frac{1}{2}BaBr_2$	1,1251	
$\frac{1}{2}SrBr_2$	1,1034	0,0217
$\frac{1}{2}CaBr_2$	1,0808	0,0226

Diese Differenzen ergeben für die Moduln der Salzkomponenten in runden Zahlen für normale Lösungen folgende Zahlen (bei 18°):

K	0,045	½Cu	0,057
Na	0,040	½Cd	0,076
NH_4	0,015	½Pb	0,118
½Ca	0,041	Ag	0,120
½Mg	0,035	Cl	0,000
½Sr	0,070	Br	0,034
½Ba	0,088	J	0,064
½Mn	0,052	NO_3	0,014
½Fe	0,052	$\frac{1}{2}SO_4$	0,020
½Zn	0,056	$\frac{1}{2}CO_3$	0,012
		HCO_3	0,015

Daraus ergibt sich z. B. die Dichte von $MgSO_4$ zu 1,000 + 0,035 + 0,020 = 1,055, während 1,057 gefunden wurde. Natürlich würde man auch alle Anionenwerte um einen bestimmten Betrag erhöhen, die Kationenwerte um ebensoviel vermindern können, um die Darstellung zu ermöglichen. Die Zahlen haben also nur relative Bedeutung.

Bezeichnet man die um 1 verminderte Dichte d wässeriger Lösungen, dividiert durch die Aequivalentkonzentration c, als Aequivalentkontraktion $k = \frac{d-1}{c}$, so ergeben sich gleichfalls ziemlich einfache Verhältnisse. Man findet also z. B. bei einer doppelt normalen Lösung von $BaCl_2$ die Dichte nach

$$d = k \cdot c + 1,$$

da nun k nichts anderes ist als die Summe der Moduln (s. oben), so wird

$$d = 1 + 2 \cdot (0{,}088 + 0{,}000) = 1{,}176$$

während 1,177 gefunden ist.

Diese Beziehung gilt bis zu mehrfach normaler Konzentration hinauf, jedoch strenger bei höherer Verdünnung; die Additivität wird also bei steigender Konzentration zunehmend konstitutiv beeinflußt. Sie bietet praktischen Nutzen.

In engem Zusammenhange mit ihr steht die Tatsache, daß bei der Neutralisation einer Säure mit einer Base Volumänderungen auftreten, die gleichfalls nahezu additiv aus je einer der Säure und der Base zukommenden Konstanten berechenbar sind.

Kapillarität und Kompressibilität. Die Beeinflussung der Oberflächenspannung durch Zusätze ist eine sehr stark individuelle Eigenschaft. Bei wässerigen Salzlösungen jedoch hat man gewisse einfache stöchiometrische Relationen finden können. Bei Lösungen von 1,5 Mol/Liter haben die Oberflächenspannungen bei 18°, wenn die des Wassers gleich 1 gesetzt wird, folgende Werte.

	Cl	Br	J	OH	NO_3
K	1,0390	1,0290	1,0191	1,0367	1,0222
Na	1,0323	1,0294	1,0214	1,0397	1,0251
Li	1,0319	1,0268	1,0160	1,0338	1,0249
NH_4	1,0272	1,0256	1,0152	-	1,0180
H	0,9949	0,9906	—	—	0,9825

Man erkennt, daß jedes Chlorid eine höhere Zahl zeigt als das entsprechende Nitrat, ebenso jedes Ammonsalz eine kleinere als das Kaliumsalz, daß jedoch kleine Ausnahmen vorhanden und die Differenzen (Moduln, s. oben) durchaus nicht für ganze Serien konstant sind.

Ganz analoge Verhältnisse zeigt die Kompressibilität, welche bei wässerigen Lösungen durch Salze erniedrigt zu werden pflegt. Für die Lösungen der vorstehenden Tabelle sind in der folgenden die (durch die Konzentration dividierten) Kompressibilitäten verzeichnet, wobei die des reinen Wassers wieder gleich 1 gesetzt ist.

	Cl	Br	J	OH	NO_3
K	0,872	0,894	0,913	0,779	0,901
Na	0,849	0,870	0,892	0,761	0,878
Li	0,868	0,887	0,918	0,782	0,893
NH_4	0,933	0,951	0,960	1,009	0,953
H	0,954	0,972	—		0,980

Alle Werte für Na-Salze sind kleiner als die für K-Salze, alle für Chloride kleiner als für Bromide. Die Differenzen sind wesentlich besser konstant als bei der Oberflächenspannung, ein Resultat, das aus theoretischen Gründen zu erwarten ist.

Die Erhöhung bei NH_4OH hängt mit dessen abnorm kleiner elektrolytischer Dissoziation zusammen.

Weitere Untersuchungen an Lösungen haben zwar ziemlich viel Zahlenmaterial, jedoch wenig einfache Regeln zutage gefördert.

Lichtbrechung. Auch hier lassen sich einfache Regeln nicht geben. Als Haupttatsache ist hervorzuheben, daß bei binären flüssigen Gemischen das Refraktionsäquivalent (s. die Artikel „Molekularlehre" und „Lichtbrechung") nur wenig von dem nach der einfachen Mischungsregel berech-

neten abzuweichen pflegt. Bezeichnet man das Refraktionsäquivalent mit R, so ist sowohl für den Landolt-Gladstoneschen Ausdruck $R = \frac{n-1}{d}$ wie für den Lorenzschen $R = \frac{n^2-1}{(n^2+2)d}$ nahezu

$$\frac{R}{d} = \frac{R_1}{d_1} p_1 + \frac{R_2}{d_2} p_2,$$

wenn R_1 und R_2 die Aequivalente der beiden reinen Stoffe, d, d_1 und d_2 die Dichten, p_1 und p_2 die Gewichtsbrüche (s. den Artikel „Chemische Einheiten") oder Molenbrüche vorstellen. Unzweifelhaft vorhandene Abweichungen kann man nach Pulfrich mittels einer etwas erweiterten Formel darstellen, welche lautet

$$\frac{R_1}{d_1} p_1 + \frac{R_2}{d_2} p_2 = \frac{R}{d} \cdot \frac{1+\alpha c}{1+c}.$$

Hierin bedeuten p_1 und p_2 Gewichtsbrüche, c den Quotienten $\frac{d-d_0}{d}$, in welchem d_0 die Dichte bezeichnet, welche das Gemisch haben würde, wenn das Mischen ohne Volumänderung erfolgte, und α den Quotienten $c^1 : c$, wenn c^1 den zu c analogen Ausdruck für R bedeutet.

Für verdünnte wässerige Lösungen genügt weitgehend die einfache Mischungsformel des Landoltschen Ausdrucks für Gewichtsbrüche.

Literatur. *Ausführliche Darstellungen stöchiometrischer Lehren finden sich in folgenden Büchern:* ***J. H. van't Hoff,*** *Ansichten über die organische Chemie. Braunschweig 1877. —* ***W. Ostwald,*** *Lehrbuch der allgemeinen Chemie. I. Teil. Leipzig 1893. —* ***L. Meyer,*** *Moderne Theorien der Chemie. — Ferner sind zu vergleichen:* ***L. Young,*** *Stoichiometry. London 1908. —* ***S. Smiles,*** *Relations between physical properties and chemical constitution. London 1910. —* ***F. Eisenlohr,*** *Spektrochemie der organischen Verbindungen. Stuttgart 1912. —* ***W. Nernst und A. Hesse,*** *Siede- und Schmelzpunkt. Braunschweig 1893. —* ***W. Marckwald,*** *Beziehungen zwischen den Siedepunkten und der Zusammensetzung chemischer Verbindungen. Berlin 1888. —* ***H. Ley,*** *Farbe und Konstitution bei organischen Verbindungen. Leipzig 1911.*

K. Drucker.

Stock.

Vgl. den Artikel „Lagerungsform der Gesteine".

Stoffwechsel.

Allgemeine Physiologie des Stoffwechsels.

1. Definition. 2. Der Baustoffwechsel: a) Die synthetischen Fähigkeiten der Organismen. α) Die Kohlenstoffquellen. β) Die Stickstoffquellen. b) Das Wachstum. c) Der Salzstoffwechsel. 3. Der Betriebsstoffwechsel: a) Die physiologische Verbrennung. b) Die Spaltungen im Betriebsstoffwechsel. c) Die Endprodukte des Stoffwechsels. 4. Der Gesamtstoffwechsel: a) Der Anteil der Oxydationen und Spaltungen am Gesamtumsatz. b) Der Anteil von Eiweiß, Fett und Kohlehydraten am Umsatz. c) Die Intensität des Stoffwechsels. d) Das Verhältnis von Bau und Betriebsstoffwechsel. 5. Die Wirkung veränderter Bedingungen auf den Stoffwechsel. a) Temperaturwirkungen. b) Lichtwirkungen. c) Die Wirkung der Konzentrationsänderung der Nährstoffe. d) Der Hunger. e) Das Leben ohne Sauerstoff.

1. Definition. Mit dem Ausdruck Stoffwechsel bezeichnet man die Gesamtheit der chemischen Umsetzungen, die an jedem Organismus vor sich gehen, solange er lebt, und die recht eigentlich der Ausdruck der Lebenstätigkeit sind.

Das Ausgangsmaterial aller Stoffwechselprozesse ist in letzter Linie die Nahrung und je nach der Art der Veränderungen, welche diese im Lebensbetriebe erfährt, unterscheidet man zwei große Gruppen von Stoffwechselvorgängen: die des Baustoffwechsels und des Betriebsstoffwechsels.

Im Baustoffwechsel werden die Nahrungsstoffe in Körperstoffe umgewandelt, und dienen entweder dazu, den Verlust an Körperstoffen zu decken, den alle Organismen durch ihre Lebenstätigkeit erfahren, gewissermaßen die Abnutzung zu ersetzen, die die lebendige Substanz erleidet (Ersatz-Baustoffwechsel), oder sie dienen zum Aufbau neuer lebendiger Substanz, der beim Wachstum notwendig ist (Anbau-Stoffwechsel).

Im Betriebsstoffwechsel werden die Nahrungsstoffe oder beim Hunger die Körperstoffe gespalten und oxydiert, wobei Energie frei wird, die zum Betriebe der Lebensmaschine ebenso unentbehrlich ist, wie der gespannte Wasserdampf zum Betrieb einer Dampfmaschine. Die Einheitlichkeit aller der Prozesse, die für den Organismus mit einem Gewinn an ausnutzbarer Energie verbunden sind, ist erst spät erkannt worden und so kommt es, daß einzelne auffällige Erscheinungen des Betriebsstoffwechsels besondere Namen erhalten haben. Den Verbrauch von Sauerstoff durch Organismen, der für den Betriebsstoffwechsel der meisten so überaus charakteristisch ist, hat man seit langem als „Atmung" bezeichnet (bei Säugetieren als „innere" Atmung im Gegensatz zu den physikalischen Erscheinungen der Luftaufnahme in die Hohlräume der Lungen).

Als sich zunächst für einige pflanzliche Organismen (Bakterien, Hefen) herausstellte, daß sie ohne Sauerstoff leben können und in diesem Falle ihre Betriebsenergie aus Spaltungen beziehen (s. u.), wurde der Begriff der Atmung in der Pflanzenphysiologie derart erweitert, daß man diese Fälle als Spaltungsatmung bezeichnete. Als besondere Form der Spaltungsatmung werden die Gärungen (s. u.) unterschieden. Damit ist der Begriff der Atmung so erweitert, daß er bedeutungsgleich mit „Betriebsstoffwechsel" geworden ist. Das Gemeinsame aller der — chemisch sehr verschiedenen — Vorgänge, die wir als Betriebsstoffwechsel bezeichnen, liegt darin, daß sie Energie für den Lebensbetrieb liefern, weshalb man auch vorgeschlagen hat, sie als „Energese" zu bezeichnen.

2. Der Baustoffwechsel. Der sinnfälligste Ausdruck der Baustoffwechseltätigkeit eines Organismus ist sein Wachstum, d. h. diejenige normale Lebenserscheinung, die sich äußert in einer bleibenden, meist mit Gestaltsveränderung vereinigten, Volumzunahme während der Periode der progressiven Entwickelung.

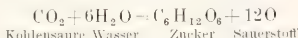
Eine solche Volumzunahme kann auf recht verschiedene Weise zustande kommen: es kann sich handeln um den unmittelbaren Erfolg der Baustoffwechseltätigkeit, d. h. um eine Vermehrung der lebendigen Substanz im engsten Sinne, und andererseits um Vermehrung von Produkten der Tätigkeit der lebendigen Substanz, z. B. um Vermehrung von Reservestoffen (Stärke, Glykogen, Fett), zu denen wir auch das Wasser und die Salze rechnen müssen, die einen so bedeutenden Anteil an der Volumzunahme vieler Organismen nehmen.

2a) Die synthetischen Fähigkeiten der Organismen. Der Aufbau neuer lebendiger Substanz aus Nahrungsstoffen erfordert stets die Synthese von Verbindungen, die für den Stoffbestand einer Tier- oder Pflanzenart charakteristisch und in der Nahrung nicht vorgebildet sind. Selbst in dem Falle, daß ein Tier als Nahrung andere Individuen derselben Spezies verwendet, ist eine solche Synthese notwendig, da die Nährstoffe vor der Aufnahme in die lebendige Substanz in der Verdauung (s. dort) tiefgreifende Spaltungen erfahren.

Die Lehre von den synthetischen Fähigkeiten der Organismen verfolgt besonders die Wege, auf denen der Kohlenstoff und der Stickstoff in die Bindungen gelangen, die diese beiden Elemente in den Stoffen des Tier- und Pflanzenkörpers zeigen.

Wenn ein Organismus mit bestimmten chemisch definierten Stoffen als einziger Nahrung leben und wachsen kann, so ist damit bewiesen, daß es die Fähigkeit hat, aus diesen Verbindungen Eiweiß, Nukleoproteide, Kohlehydrate und Lipoide herzustellen, denn diese Stoffe fehlen in keiner Form der lebendigen Substanz.

α) Die Kohlenstoffquellen. Das einfachste Material, aus dem Organismen Kohlenstoffverbindungen bilden könnten, ist der elementare Kohlenstoff z. B. in Form von Ruß oder Kohle und in der Tat scheint es einzelne Bakterien zu geben, die diese Fähigkeit besitzen, doch ist darüber nur sehr wenig bekannt. Alle anderen Organismen decken ihren Kohlenstoffbedarf aus Kohlenstoffverbindungen. Die höchste Oxydationsstufe des Kohlenstoffs, die Kohlensäure (CO_2) dient den grünen Pflanzen und einer Reihe von Bakterien als Kohlenstoffquelle. Die grünen Pflanzen führen die Reduktion der Kohlensäure, die ihre Umwandlung in Körpersubstanzen erfordert, mit Hilfe des Lichtes durch nach der Formel



$$CO_2 + 6H_2O = C_6H_{12}O_6 + 12O$$

Kohlensaure Wasser Zucker Sauerstoff

Bei den Bakterien, die CO_2 zum Aufbau der Stoffe ihres Körpers verwenden, wird die Energie, welche zur Ausführung der Reduktion nötig ist, durch Oxydation verschiedener Nährstoffe geliefert (s. Betriebsstoffwechsel). Es gehören vor allem zu diesen Formen die Eisenbakterien, Salpetersäure- und Salpetrigsäurebakterien (Nitro- und Nitrosobakterien) und einige Thiosulfatbakterien.

Das Kohlenoxyd (CO), das für die Wirbeltiere ein starkes Gift ist, dient einem Bazillus (Bacillus oligocarbophilus) als Kohlenstoffquelle.

Sehr viel weniger zahlreich als die Arten, welche aus der höchsten Oxydationsstufe des Kohlenstoffs ihren Kohlenstoffbedarf decken, sind diejenigen, welche die sauerstoffärmsten Kohlenstoffverbindungen benutzen, z. B. das Methan (CH_4) oder höhere Homologe der Paraffinreihe, doch fehlt es auch für diese Fähigkeit nicht an Beispielen aus den Reihen der Bakterien und Pilze. Von der ganzen Fülle der organischen Verbindungen, welche zwischen diesen beiden Extremen liegen, ist keine zu nennen, die nicht irgendeinem Organismus als Nahrung dienen könnte, doch bestehen quantitativ sehr große Unterschiede in der Fähigkeit der verschiedenen Verbindungen, einen lebhaften Baustoffwechsel zu unterhalten.

Züchtet man z. B. den Pilz Aspergillus niger auf einer Lösung von 1% Asparagin als Stickstoffquelle, der die verschiedenen Kohlenstoffquellen zugesetzt werden, so ist die trockene Pilzernte, die man in gleichen Zeiten unter ganz gleichen Bedingungen erhält sehr verschieden. Werden stets 3 g der Kohlenstoffverbindung auf 100 ccm gegeben,

so erhält man z. B. nach 22 Tagen (bei 28° C) mit

Methylal	$H_2C\begin{smallmatrix}OCH_3\\OCH_3\end{smallmatrix}$	53,5 mg Pilzernte
Glycerin	CH_2OH / $\vert$ / $CHOH$ / $\vert$ / CH_2OH	288,6 „
d-Glykose (Traubenzucker)		477,1 „
Maltose (Malzzucker)		550,2 „
Inulin		619,6 „

Dabei wird die Erwartung, daß chemisch ähnliche Verbindungen auch annähernd gleich gut ausgenutzt werden, durchaus **nicht** bestätigt. Z. B. erreicht man mit Aethylenglykol $\left(\begin{smallmatrix}CH_2OH\\ \vert \\CH_2OH\end{smallmatrix}\right)$ 74,3 mg Ernte, mit Propylenglykol $\left(\begin{smallmatrix}CH_3-CHOH\\ \vert \\CH_2OH\end{smallmatrix}\right)$ dagegen gar kein Wachstum.

Man kann auch nicht bestimmte Verbindungen allgemein als schlechte, andere als gute Kohlenstoffquellen bezeichnen, denn während Essigsäure und Alkohol für die meisten Pilze schlechte Kohlenstoffquellen sind, gedeiht ein bestimmter Pilz, Mycoderma aceti, gerade mit ihnen am besten, und der Traubenzucker, der für die Mehrzahl aller daraufhin untersuchter Organismen eine vorzügliche Kohlenstoffquelle ist, ist für die oben erwähnten Nitro- und Nitrosobakterien direkt ein Gift.

β) Die Stickstoffquellen. Da alle Organismen in ihrem Stoffbestande Eiweiß enthalten, das durch seinen Stickstoffgehalt gegenüber den Kohlehydraten und Fetten ausgezeichnet ist, so ist die Zufuhr von Stickstoff in ausnutzbarer Form eine unbedingte Notwendigkeit für jedes Lebewesen. In nahezu unerschöpflicher Menge ist der Stickstoff als Gas in der Erdatmosphäre vorhanden, aber nur wenige Bakterien haben die Fähigkeit, diese reichlichste aller möglichen Stickstoffquellen auszunutzen. Vor allem gehören hierher eine Reihe Bodenbakterien aus den Gattungen Clostridium und Azotobacter, welche bei sorgfältigem Ausschluß aller Stickstoffverbindungen mit Luftstickstoff als einziger Stickstoffquelle zu wachsen vermögen. Nicht weniger wichtig, als die frei im Ackerboden und in den natürlichen Gewässern lebenden stickstoffbindenden Formen sind jene Bakterien, die auf einer Reihe höherer Pflanzen (hauptsächlich Leguminosen) leben und an ihnen die Bildung der sogenannten Wurzelknollchen veranlassen. Durch diesen Besitz sind die Pflanzen befähigt in völlig stickstofffreiem Boden zu wachsen, ja eine Zugabe von Stickstoffverbindungen, die das Wachstum anderer Pflanzen bedeutend steigert, führt bei den Leguminosen zu keiner Steigerung der Produktion mehr, da diese Pflanzen durch ihre stickstoffsammelnden Bakterien schon in bester Weise mit diesem unentbehrlichen Stoff versorgt sind (s. Fig. 1).

Außer den genannten Bakterien haben nur eine kleine Anzahl höherer Pilze die Fähigkeit, den elementaren Stickstoff auszunutzen (darunter die häufigen Penicillium glaucum und Aspergillus niger), während für Algen ein sicherer Nachweis dieser Fähigkeit, die allen übrigen Organismen fehlt, zurzeit aussteht.

Die große Mehrzahl aller höheren Pflanzen bevorzugt als Stickstoffquelle die Salpetersäure (HNO_3), die in Form ihrer Kalium- und Natriumsalze im Boden vorhanden ist.

Im Eiweiß ist der Stickstoff größtenteils in der Bindung NH_2, der Aminogruppe, enthalten, und so läge die Vermutung nahe, daß Verbindungen, die diese Gruppe enthalten, also die Ammoniaksalze, als bessere Stickstoffquellen dienen müßten, wie die Salpetersäure. Das ist aber nicht der Fall und für die höheren Pflanzen ist das Ammoniak eine schlechtere Stickstoffquelle als die Salpetersäure.

Dagegen kennen wir typische Ammoniakverwerter in den Hefen. Diese können nicht nur Ammoniumkarbonat, also gute Stickstoffnahrung verwenden, sondern auch Aminosäuren und deren Amide. Es scheint das nächstliegende, daß die Hefe, wenn ihr Aminosäuren geboten werden, diese direkt zur Eiweißsynthese verwendet, denn sie sind ja bereits normale Bausteine des Eiweißmoleküls. Tatsächlich aber spalten die Hefen die Aminosäuren in Ammoniak und Fuselöle, verwenden ersteres zum Eiweißaufbau und lassen die Fuselöle als für sie unausnutzbare Reste zurück.

Alle bisher erwähnten Organismen hatten die Fähigkeit aus einfachen Stickstoffverbindungen unter gleichzeitiger Verwendung stickstofffreier Kohlenstoffquellen die Bausteine des Eiweiß, die Aminosäuren, aufzubauen. Bei den verschiedensten Wesen aber treffen wir diese Fähigkeit nicht mehr an, sie sind vielmehr auf die Zufuhr fertiger Aminosäuren angewiesen, mit deren Hilfe sie allein den Aufbau des Eiweiß auszuführen vermögen.

Als erste Gruppe dieser „Aminosäurenorganismen" können wir solche betrachten, die schon Eiweiß bilden können, wenn ihnen nur eine oder einzelne Aminosäuren oder deren Amide (z. B. das Asparagin) zur Verfügung stehen. Da auch ihr Körpereiweiß alle oder fast alle 18 Aminosäuren enthält, die als die allgemein verbreiteten Bausteine



Fig. 1. Die Pflanzen wurden in einem sehr stickstoffarmen Ackerboden ohne Zusatz (0), mit Zugabe von Kaliphosphat (KP) und von Kaliphosphat + Kalisalpeter (KPS) erzogen. Die übrigen Aschenbestandteile waren im Boden in genügender Menge enthalten, der auch nicht frei von Stickstoff usw. war und dieserhalb verursachte, daß Erbsen (A) und Hafer (B) sich etwas weiter entwickelten, als es in ganz stickstofffreiem Boden der Fall sein würde. Nach Wagner aus Pfeffer.

jedes Eiweiß bekannt sind, so haben sie auf jeden Fall die Fähigkeit, aus einer Aminosäure eine beliebige andere zu machen, und es fehlt ihnen nur die Fähigkeit, die Gruppe $.CH.NH_2.COOH$ zu bilden, die für alle Aminosäuren charakteristisch ist.

Die höchste Spezialisierung, die geringsten synthetischen Fähigkeiten, finden wir endlich bei den Organismen, die ein Gemisch aller oder fast aller Aminosäuren in der Nahrung erhalten müssen, um ihren Eiweißbestand zu erhalten, bezw. um neues Körpereiweiß zu bilden.

Hierhin gehören die Insekten, Vögel und Säugetiere. Für die letzteren liegen die ausgedehntesten Versuche vor, die ergeben haben, daß ein Säugetier in gutem Ernährungszustande erhalten werden kann, wenn es als einzige Stickstoffquelle ein Gemisch von Stoffen erhält, daß durch vollständige Verdauung von Eiweiß durch Magensaft, Saft der Bauchspeicheldrüse und Darmsaft hergestellt ist. In einem solchen Verdauungsgemisch finden sich keine größeren Bruchstücke des Eiweißmoleküls mehr, sondern nur dessen einfachste kristallinische Spaltungsprodukte, die Aminosäuren. Mit diesem selben Gemisch gelingt es auch, junge, wachsende Säugetiere (Hunde) zu normalem Wachstum zu bringen. Dabei ist der Nachweis höchst wesentlich, daß es gelingt, die Tiere mit derselben Stickstoffmenge im Stoffbestande zu erhalten bezw. zum Wachstum zu bringen, wenn man den Stickstoff in Form der natürlichen Eiweißkörper gibt, als wenn man ihn in Form des Aminosäurengemisches gibt.

Da von keinem der hierbei verwendeten Eiweißkörper der Stickstoff der aus ihnen dargestellten Aminosäuren 100% des Gesamtstickstoffs beträgt, d. h. da bei allen diesen Eiweißkörpern ein unanalysierter Rest zurückbleibt, so lag die Möglichkeit vor, daß in diesem Rest, der ja in dem Verdauungsgemisch auch enthalten ist, noch unbekannte und biologisch wichtige, unvertretbare Stickstoffverbindungen enthalten wären. Das dies nicht der Fall ist, zeigen Versuche, bei denen ein Gemisch bekannter, rein dargestellter Aminosäuren verfüttert wurde, die in etwa denselben Mengenverhältnissen gemischt waren, in denen sie im Eiweiß enthalten sind. Auch mit diesem Gemisch gelingt es, die Tiere vollwertig zu ernähren, ja es zeigt sich, daß einzelne Aminosäuren noch entbehrt werden können. Wenn man das Verdauungsgemisch aus Kasein als Stickstoffquelle benutzt, so gelingt

die vollwertige Ernährung der Tiere, obgleich im Kasein das Glykokoll (Aminoessigsäure) fehlt, auch das Prolin (α-Pyrrolidinkarbonsäure) kann noch entfernt werden ohne den Wert des Aminosäurengemisches als Stickstoffquelle herabzusetzen, dagegen reicht ein Aminosäurengemisch, in dem das Tryptophan (Indolaminopropionsäure) fehlt, nicht mehr als Stickstoffquelle aus und ebensowenig darf eine Aminosäure der aromatischen Reihe, Tyrosin (Para-oxy-phenyl-α-aminopropionsäure) oder Phenylalanin (Phenyl-α-aminopropionsäure) fehlen. Sind bei Vögeln und Insekten die Untersuchungen auch noch nicht bis zu dieser Feinheit durchgeführt, so geht doch aus einer Reihe Erfahrungen hervor, daß auch ihnen die Fähigkeit der Synthese von Aminosäuren fehlt, oder doch nur in etwa ebenso bescheidenen Grenzen zukommt, wie den Säugetieren.

2b) Das Wachstum. Der augenfälligste Ausdruck der Baustoffwechseltätigkeit der Organismen ist 1. die Vermehrung der Elementarorganismen, der Zellen, und 2. das Wachstum. Die Zunahme des Bestandes einer einzelnen Zelle an organisierter Substanz ist in ziemlich enge Grenzen eingeschlossen, sobald eine gewisse obere Grenze des Stoffbestandes erreicht ist, teilt sich die Zelle, oder es tritt Stillstand des Wachstums ein.

Man kann ein Maß für die Geschwindigkeit, mit welcher neue lebendige Substanz geschaffen wird, gewinnen, wenn man die Geschwindigkeit der Zellteilung mißt. Wenn eine Reihe von Teilungen einander folgt, so dürfen wir annehmen, daß in der Zeit zwischen zwei Teilungen eine Verdoppelung des Stoffbestandes erfolgt ist. Eine solche „Doppelwertzeit" gibt eine gute Vorstellung von der Intensität der Prozesse des Baustoffwechsels.

Bei dem Vergleich der Teilungsgeschwindigkeiten verschiedener Zellarten macht die ungeheuere Variabilität dieses Wertes Schwierigkeiten. Als wirklich vergleichbare Werte können nur solche gelten, bei denen die Teilungen unter den günstigsten äußeren Bedingungen erfolgen. Die größten Teilungsgeschwindigkeiten finden sich bei Bakterien, also bei den kleinsten bekannten Formen lebendiger Systeme. Hier beträgt die Doppelwertzeit unter günstigen Umständen nur 20 Minuten oder 0,3 Stunden. Bei vielen Algen erfolgt höchstens einmal im Laufe eines Tages eine Teilung (Peridinium, Ceratium), so daß die Doppelwertzeit 24 Stunden ist. Dazwischen liegen die Werte für viele Protozoen, die einige Stunden zu einer Teilung brauchen. Auch die ersten Zellteilungen der Eizelle bei Beginn der Entwickelung vielzelliger Tiere (Ciona, Strongylocentrotus) dauern teils weniger als eine Stunde, teils einige wenige Stunden.

Die Massenzunahme höherer Organismen bedeutet nicht immer eine Zunahme an neu aufgebauter organischer Substanz, einen sehr bedeutenden Anteil an der Volumenzunahme nimmt vielmehr bei Pflanzen wie bei Tieren das Wasser. Es ist für Pflanzen seit langem bekannt, daß das Längenwachstum großenteils durch die Streckung der Zellen unter reichlicher Wasseraufnahme erfolgt. Die Untersuchung gestaltet sich dabei relativ einfach, da das Wachstum auf eine enge Zone beschränkt ist. Figur 2 zeigt

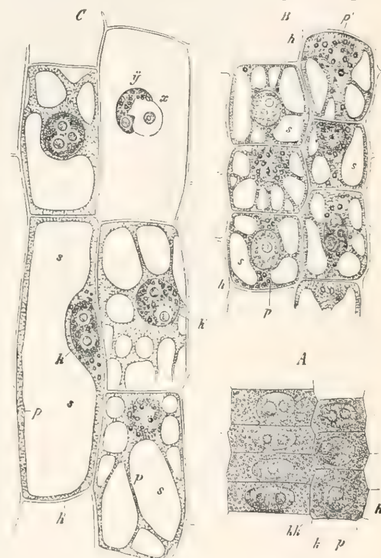


Fig. 2. Parenchymzellen aus der mittleren Schicht der Wurzelrinde von Fritillaria imperialis. Längsschnitt. Vergrößerung 550. A dicht über der Wurzelspitze liegende Zellen, B die gleichnamigen Zellen etwa 2 mm von der Wurzelspitze, C die gleichnamigen Zellen etwa 7 bis 8 mm über der Wurzelspitze, s Zellsafträume. Nach Sachs aus Schaper.

die Zunahme der Größe der Zellsafträume in den wachsenden Zellen einer Pflanze (Fritillaria imperialis) und Figur 3 die Zunahme des Wassergehaltes der stark wachsenden II. und III. Internodien einer anderen Pflanze (Heterocentron). Auch bei Tieren spielt solche Wasseraufnahme beim Wachstum eine bedeutende Rolle, z. B. beim Frosch, bei dem der Wassergehalt von 66,67% auf 95,02% steigt, während die Larven von 3,75 mm zu 30 mm Länge heranwachsen

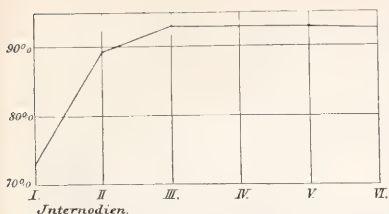


Fig. 3. Kurve des Prozentgehaltes an Wasser in aufeinander folgenden Internodien von Heterocentron, von der Spitze bis zum fünften. Nach Kraus aus Schaper.

Die Zahlen, welche angeben, in welcher Zeit ein wachsendes Tier sein Gewicht verdoppelt, sind daher nicht ohne weiteres mit den Doppelwertzeiten bei der Zellteilung zu vergleichen, wo es wirklich zu einer Verdoppelung der organischen Substanz kommt. Wie verschieden solche Verdoppelungszeiten bei den einzelnen Tieren sind, mögen einige Beispiele zeigen. Sie beträgt für die Fliege Calliphora 12,8 Stunden, für die Bienenlarve 14,5, die Seidenspinnerraupe 68 Stunden. Das Gewicht des wachsenden Hühnchens verdoppelt sich am 4. bis 6. Tage der Bebrütung in je 13,6 Stunden, am 7. bis 11. Tage in je 29,2 Stunden. Bei den Säugetieren liegen eine Anzahl von Zahlen vor, welche angeben, in welcher Zeit sich das Geburtsgewicht verdoppelt, z. B.:

	Geburtsgewicht g	Verdoppelungszeit Tage
Kaninchen	60	6
Meerschweinchen . .	120	18
Schaf	4 000	10
Mensch	4 000	180
Pferd	70 000	60

Diese Zahlen sind insofern nicht einmal untereinander vergleichbar, weil der Zustand, in dem die einzelnen Säugetiere zur Welt kommen, einen sehr verschiedenen Grad der Entwickelung darstellt.

2c) Der Salzstoffwechsel. Um ein normales Wachstum zu ermöglichen, genügt es nicht, daß alle organischen Verbindungen in genügender Menge und geeigneter Qualität zur Verfügung stehen, es sind vielmehr eine Reihe von Salzen nötig, die als normale Bestandteile jedes Organismus vorkommen. Aus der Menge eines Salzes und der Verbreitung, die es bei verschiedenen Organismen hat, kann man keinen Schluß auf seine physiologische Bedeutung ziehen, erst das Experiment, in dem festgestellt wird, ob ein normales Wachstum ganz ohne, bezw. mit viel geringeren Mengen des Salzes möglich oder nicht möglich ist, lehrt uns seine Bedeutung richtig beurteilen.

So kommen Natrium, Silicium und Chlor ganz allgemein bei allen Organismen vor, aber für die Pflanzen wenigstens sind sie in den meisten Fällen keine notwendigenn Stoffe, da normale Entwickelung auch ohne sie erfolgt. Die Anforderungen der Tiere an die Salzzufuhr sind im allgemeinen höhere, als jene der Pflanzen, doch gibt es auch unter ihnen anspruchsvollere und besonders anspruchslose, und nicht jede Pflanze reicht mit einem Salzgemisch aus, das nur Schwefel, Phosphor, Kalium, Magnesium und Eisen enthält, wie dies einige Schimmelpilze können. Die höheren Pflanzen und die Tiere können z. B. das Calcium nicht entbehren.

Die Anforderungen an die Leistungen der Salze, über die wir kaum etwas genaueres sagen können, sind in hohem Maße spezifisch und es ist im allgemeinen nicht möglich, ein Element in allen seinen Leistungen durch ein anderes, chemisch sehr ähnliches zu ersetzen, z. B. Kalium durch Natrium, Lithium oder Caesium. Bisher ist nur ein Fall voller Vertretbarkeit zweier Elemente sichergestellt, nämlich die Vertretbarkeit des Kalium durch Rubidium bei einigen Schimmelpilzen. Dagegen können sich in einzelnen Leistungen die Salze sehr wohl vertreten. Das ergibt sich aus den Erfahrungen über die minimalen Mengen, in denen die einzelnen Salze gegeben werden müssen, um normale Entwickelung zu ermöglichen, im Vergleich mit dem Gesamtminimum an Salzen, die zur normalen Entwickelung nötig sind. Stellt man bei reichlicher Menge aller übrigen Salze für jedes einzelne das Minimum fest, das volle normale Entwickelung ermöglicht (d. h. bestimmt man die sogenannten Spezialminima), so reicht die Summe aller dieser Teilminima nicht zur vollen Entwickelung aus. Während z. B. für die Haferpflanze die Summe der Spezialminima nur 2% ist, tritt normales Wachstum erst ein, wenn die Gesamtmenge der Salze nicht unter 3 bis 4% beträgt. Es können eben einzelne Leistungen eines Salzes durch andere Salze vollbracht werden, wenn diese in überschüssiger (d. h. mehr als minimaler) Menge vorhanden sind. Werden aber alle Salze nur in minimaler Menge gegeben, so bleibt nichts für solche Stellvertretungen übrig und ein normales Wachstum ist unmöglich. Wie gering häufig die Mengen einzelner Elemente sind, die zur Ermöglichung vollen Wachstums hinreichen, mag ein Beispiel zeigen. Bei einigen Bakterien (Bacillus pyocyaneus und Bacillus fluorescens liquefaciens) trat volle Entwickelung ein, wenn Kalium nur in Mengen von

etwas mehr als $^1/_{10}$ mg im Liter vorhanden war, eine Menge von $^1/_{30}$ mg pro Liter ermöglichte schon eine mäßige Entwickelung.

Die Funktionen der Salze im normalen Stoffwechsel sind offenbar recht verschiedenartig. Ein Teil dient, in den stützenden Elementen abgelagert, zur mechanischen Festigung (Knochen, Schalen, Panzer), ein Teil erhält einen bestimmten osmotischen Druck, der vielen Zellen eine nicht unbedeutende Festigkeit auch dann verleiht, wenn keine festen stützenden Elemente vorhanden sind, ein anderer Teil dient z. B. zur Neutralisation von Säuren, die im Stoffwechsel gebildet werden. Schwefel und Phosphor, die in anorganischen Salzen zugeführt werden, können im Eiweiß wie in einigen Lipoiden festgelegt, d. h. in organische Bindungen gebracht werden.

Eine wichtige Funktion vieler Salze liegt darin, die Wirkung anderer — antagonistisch wirkender — aufzuheben, also gewissermaßen als Gegengifte zu wirken.

Die Salzlösungen, in denen ein Organismus leben kann, sind für ihn „ausgeglichene" Lösungen, d. h. es halten sich in solchen Lösungen die Wirkungen der einzelnen Salze gerade das Gleichgewicht. So ist das Meerwasser für die marinen Tiere eine ausgeglichene Lösung. Für alle Gewebezellen ist die Körperflüssigkeit, von der sie umspült sind, eine ausgeglichene Lösung.

Daß die Gegenwart der Salze für die Organismen, die in einer bestimmten Salzlösung leben, nicht generell erforderlich ist, zeigen z. B. Erfahrungen an dem marinen Fisch Fundulus, der in destilliertem Wasser leben und dessen Eier sich darin entwickeln können, ebenso wie im Seewasser. Wird aber dem destillierten Wasser eines der Salze allein zugesetzt, die im Meere enthalten sind, so wirkt es als Gift. Die giftige Wirkung kann verringert werden durch Zusatz anderer Salze und wenn alle Seesalze im richtigen Mischungsverhältnis geboten werden, so heben sich alle Giftwirkungen gerade auf, die Lösung ist dann physiologisch ausgeglichen. Für Pflanzen liegen ganz ähnliche Erfahrungen vor, und zwar sowohl für marine Pflanzen (Ruppia) wie für Landpflanzen. Weizenpflanzen z. B. wachsen in einer Lösung von 0,12 Mol. Konzentration von Magnesiumchlorid nur 5 mm, in einer Lösung von 0,12 Mol. Kochsalz 55 mm, in einer Lösung aber, die bei gleicher Konzentration Kochsalz und Magnesiumchlorid im Verhältnis 100 : 7,5 enthält, beträgt das Wachstum 210 mm. Die schädigenden Wirkungen der beiden Salze haben sich gegenseitig verringert.

Vielleicht gehören hierher auch eine Reihe von Erfahrungen über die fördernde Wirkung, die viele Gifte in hoher Verdünnung auf das Wachstum von Tieren und Pflanzen ausüben.

Schimmelpilze bilden in guten Nährlösungen bei Zusatz von z. B. 0,008% Zinksulfat mehr als doppelt, bei Zusatz von 0,130% Eisensulfat fast dreimal soviel Pilzsubstanz, als ohne diese Zusätze.

Die Gärtätigkeit der Hefen wird durch Zusatz von Sublimat in Verdünnungen von 1 : 300000, von Kupfersulfat 1 : 600000, Karbolsäure 1 : 1000 erheblich gefördert, während höhere Konzentrationen derselben Stoffe die Gärung aufheben, die Organismen abtöten. Auch bei Protozoen ist ähnliches bekannt. So teilen sich Infusorien (Stylonychia) in einer Lösung von Arseniksäureanhydrid bei Verdünnungen von 1 : 10 Millionen rascher, als ohne diesen Zusatz, was in Analogie mit der Tatsache gesetzt werden kann, daß junge Säugetiere rascher wachsen, wenn sie kleine Dosen dieses starken Giftes erhalten.

3. Der Betriebsstoffwechsel. Die Prozesse des Betriebsstoffwechsels sind, wie oben erwähnt, dadurch charakterisiert, daß bei ihnen stets Energie frei wird. Es muß die Verbrennungswärme der Produkte, die in einem Betriebsstoffwechselprozeß entstehen, stets geringer sein, als diejenige des Ausgangsmaterials.

3a) Die physiologische Verbrennung. Den höchsten Gewinn an freier Energie erhält man aus einem Stoffe durch seine vollständige Oxydation, durch seine Verbrennung. Eine solche Verbrennung findet in weitestem Umfange in der lebendigen Substanz fast aller Organismen statt, ja in einer leicht verständlichen, wenn auch unberechtigten Verallgemeinerung hat man die Rolle der Oxydationsvorgänge im Lebensbetriebe derart überschätzt, daß man gesagt hat: das Leben ist ein Oxydationsprozeß. Die Energiemenge, die bei vollständiger Oxydation einer Verbindung frei wird, wird gemessen durch seine Verbrennungswärme.

Für die richtige Bewertung der Prozesse des Betriebsstoffwechsels als energieliefernde Vorgänge sind diejenigen Fälle besonders lehrreich, in denen anorganisches Material als Energiequelle dient, denn hier tritt der Unterschied gegenüber dem Baustoffwechsel scharf hervor, in welchem neue organische Substanz aufgebaut wird, was natürlich nur unter Zufuhr des Kohlenstoffs oder seiner Verbindungen geschehen kann. Als anorganisches Betriebsstoffwechselmaterial dienen einer ganzen Reihe von Bakterien das Eisen, der Schwefel und das Ammoniak sowie der Wasserstoff.

Die Verbrennung von Wasserstoff zu Wasser, bei der für 1 g entstehendes Wasser

3,8 Kalorien frei werden, liefert dem Bacillus pantotrophus seine Betriebsenergie.

Schwefel und Schwefelwasserstoff werden von den sogenannten Schwefelbakterien aus den Gattungen **Beggiatoa** und **Thiotrix** durch Oxydation zu Schwefelsäure ausgenutzt, wobei für 1 g Schwefelsäure, wenn sie durch Oxydation von Schwefel entstanden ist, 1,44 Kal. frei werden, während die Verbrennung des Schwefelwasserstoffs 2,05 Kal. auf 1 g Schwefelsäure liefert.

Die Eisenbakterien (**Spirophyllum ferrugineum**) oxydieren Ferrosalze (Ferrokarbonat) zu Ferrisalzen, wobei sie Energie gewinnen, und endlich erfolgt die Verbrennung des Ammoniak zu Salpetersäure in zwei Schritten, indem die eine Gruppe der Bakterien (Nitrosobakterien) aus Ammoniak salpetrige Säure bilden, die andere (Nitrobakterien) die salpetrige Säure zu Salpetersäure verbrennt.

Bei der größten Zahl aller Organismen werden aber organische Verbindungen im Betriebsstoffwechsel verbrannt, wobei — wenn die Oxydation eine vollständige ist — Kohlensäure (CO_2) und Wasser (H_2O) als Endprodukte entstehen.

Für irgendeinen Organismus ist wohl jede in der Natur vorkommende organische Verbindung als Material des Betriebsstoffwechsels verwertbar. So kennen wir einen Bazillus (oligocarbophilus), der Kohlenoxyd CO — für Säugetiere ein rasch tötendes Gift, die höheren Pflanzen ein recht indifferentes Gas — in seinem Betriebsstoffwechsel oxydiert, ein anderer (Bacillus methanicus) verwertet Sumpfgas (Methan, CH_4) und so ließe sich für alle möglichen Verbindungen ein Konsument angeben. In weitestem Umfange werden aber die Stoffe zur physiologischen Verbrennung benutzt, welche den Stoffbestand aller Organismen bilden: die Kohlehydrate, Fette und Eiweißstoffe. Dabei liefert 1 g eines Kohlehydrates bei vollständiger Verbrennung 3,8 bis 4,2 Kal., 1 g Fett 9,2 bis 9,3 Kal. 1 g Eiweiß würde bei vollständiger Oxydation 5,92 Kal. liefern, da aber den bei weitem meisten Organismen die Fähigkeit fehlt, die Aminogruppe (NH_2) im Eiweiß zu oxydieren, so können diese alle nur eine geringere Energiemenge aus dem Eiweiß ziehen, höchstens 4,8 Kal. für 1 g, ja die Säugetiere gewinnen nur 4,1 bis 4,2 Kal.

Um die genannten Energiemengen aus den Nahrungsstoffen (oder beim Hunger aus den Körperstoffen) zu gewinnen, ist eine ganz bestimmte Menge Sauerstoff für jeden Stoff erforderlich. Wir nennen die Menge Sauerstoff, welche erforderlich ist, um 1 g einer Substanz zu verbrennen, die „**Sauerstoffkapazität**" des Stoffes. Kennt man also die chemische Beschaffenheit der Stoffe, welche von einem Organismus oxydiert werden, und bestimmt die Menge Sauerstoff, welche er verbraucht, so kann man unmittelbar die Menge der verbrannten Stoffe angeben. Der Sauerstoffverbrauch ist damit ein wichtiges Maß für die Intensität des Betriebsstoffwechsels.

Die folgende kleine Zusammenstellung gibt für einige physiologisch wichtige Stoffe ihre Sauerstoffkapazität, ihren Brennwert, und diejenige Energiemenge, welche aus dem Stoffe für je 1 g Sauerstoff entsteht, das bei der Oxydation verbraucht wurde. Man nennt diese letztere Zahl den „**Brennwert des Sauerstoffs**" und sie ist für die meisten organischen Verbindungen nahezu gleich.

Substanz	Sauerstoff-kapazität für 1 g	Verbrennungswärme für 1 g	Brennwert des Sauerstoffs
Methan . . .	4,000	13,20	3,30
Essigsäure . .	1,067	3,49	3,272
Stearinsäure .	2,930	9,549	3,259
d-Glukose . .	1,067	3,743	3,508
Maltose. . . .	1,123	3,949	3,520
Stärke	1,185	4,183	3,530
Glykokoll . .	0,960	3,128	3,258
Glycerin . . .	1,220	4,270	3,50
Alkohol . . .	2,080	7,100	3,40
Elastin	1,840	5,961	3,24

Nicht alle Organismen verbrennen ihr Stoffwechselmaterial vollständig, es bleiben vielmehr öfters oxydationsfähige Stoffe im Umsatz eines bestimmten Organismus unverbrannt und werden als Endprodukte ausgeschieden, die dann ein anderer Organismus mit weiter gehenden chemischen Fähigkeiten vollständig verarbeitet. So oxydieren die Essigsäurebakterien den Alkohol, der ihr Stoffwechselmaterial bildet, nicht bis zur Kohlensäure, sondern nur bis zur Essigsäure, wobei sie eine dementsprechend geringere Menge Energie gewinnen, wie bei der vollständigen Oxydation, nämlich nur 36% der Verbrennungswärme.

Verbreitet findet sich im Pflanzenreich und wohl auch bei Tieren die Oxalsäure als Produkt unvollständiger Verbrennung. Würde Zucker, anstatt bis zur Kohlensäure nur bis zur Oxalsäure abgebaut, so erhält man nur 73% seiner Verbrennungswärme als frei werdende Energiemenge.

3b) **Die Spaltungen im Betriebsstoffwechsel.** Wenn die Oxydation auch die größte Menge Energie aus einer Verbindung zu gewinnen gestattet, so stellt sie durchaus nicht den einzigen Weg dar, auf dem Betriebsenergie gewonnen werden kann. Es spielen vielmehr im Stoffwechsel eine

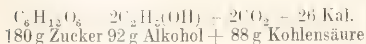
ganze Reihe von Prozessen eine Rolle, bei denen kein Sauerstoff verbraucht wird, die keine Oxydationen sind, und bei denen doch Energie gewonnen wird. Es handelt sich dabei stets um Spaltungen, die nach recht verschiedenem Typus verlaufen können.

Ganz allgemein verbreitet ist die Fähigkeit, unter Aufnahme von Wasser die Eiweißkörper, Fette und höheren Kohlehydrate zu spalten. Man nennt diese Art der Spaltungen hydrolytische (Hydrolysen) und es entstehen bei ihnen aus dem Eiweiß Aminosäuren, aus den Fetten Glycerin und Fettsäure, aus den höheren Kohlehydraten die einfachen, die Monosaccharide. Der Gewinn an freier Energie ist bei allen diesen Hydrolysen ein recht geringer.

Eine besondere Gruppe von Hydrolysen bilden die Desamidierungen, bei denen aus Verbindungen, welche die Aminogruppe (NH_2) enthalten, diese unter Aufnahme von Wasser abgespalten wird. Der einfachste Fall dieser Art ist die Zerlegung des Harnstoffs in Kohlensäure und Ammoniak, wie sie durch eine ganze Anzahl von Bakterien und Schimmelpilzen bewirkt wird, die aus dieser Reaktion, zum Teil ausschließlich, ihre Betriebsenergie gewinnen. Auf 1 g Harnstoff, das in dieser Weise zerlegt wird, werden 0,24 Kal. gewonnen.

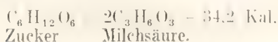
Die größte Bedeutung als energieliefernde Prozesse, die ohne Sauerstoffverbrauch verlaufen, haben die Spaltungen, welche seit langem als **Gärungen** bezeichnet werden. Der Begriff wird nicht immer auf Prozesse beschränkt, die ohne Sauerstoffverbrauch verlaufen, doch ist eine solche Beschränkung sehr wünschenswert.

Der bekannteste Prozeß dieser Art ist die Alkoholgärung des Zuckers, welche nach der Formel verläuft



$$C_6H_{12}O_6 = 2C_2H_5(OH) + 2CO_2 + 26 \text{ Kal.}$$
180 g Zucker 92 g Alkohol + 88 g Kohlensäure

Es werden hierbei für je 1 g Alkohol 0,283 Kal. frei. Die Ausnutzung der Energie des Zuckers ist nur gering, es sind nur 3,8% seines Brennwertes, die in dieser Spaltung frei gemacht werden. Bei niederen Organismen, besonders bei den Hefepilzen, seit langem bekannt, ist dieser Prozeß in neuerer Zeit auch für höhere Pflanzen und für tierische Gewebe nachgewiesen. Nicht minder weit verbreitet ist die Zerlegung des Zuckers in der Milchsäuregärung, die nach der Gleichung verläuft



$$C_6H_{12}O_6 = 2C_3H_6O_3 + 34,2 \text{ Kal.}$$
Zucker Milchsäure.

Bei Pflanzen und Tieren ist Milchsäurebildung nachgewiesen, während aber bei den höheren Pflanzen die Alkoholbildung eine sehr reichliche ist, tritt die der Milchsäure ganz zurück, umgekehrt wie bei tierischen Geweben, in denen Milchsäurebildung leicht, Alkoholbildung viel schwerer nachzuweisen ist.

Von den verschiedenen Typen der Zerlegung des Zuckers ohne Sauerstoff (der anaeroben Zerlegung) spielt noch die Buttersäuregärung eine bedeutendere Rolle und endlich ist eine Gärung zu erwähnen, die als erste näher untersuchte tierische Gärung interessant ist, das ist die Vergärung von Glykogen zu Valeriansäure (und Capronsäure) beim Spulwurm (Ascaris).

3c) **Die Endprodukte des Stoffwechsels.** Würden alle organischen Verbindungen, welche im Stoffwechsel der Organismen verarbeitet werden, vollständig oxydiert, so würde aller Kohlenstoff als Kohlensäure (CO_2), aller Wasserstoff als Wasser (H_2O) und der Stickstoff als Salpetersäure (H_2NO_3) erscheinen.

Tatsächlich kommen aber viel zahlreichere Stoffe als Endprodukte vor und zeigen, daß das Stoffwechselmaterial nicht vollständig oxydiert worden ist oder daß Spaltungsprodukte ausgeschieden worden sind.

Ein Maß für die Vollständigkeit der Verarbeitung der stickstofffreien Verbindungen haben wir in dem Verhältnis der Menge der ausgeschiedenen Kohlensäure zur Menge des gesamten ausgeschiedenen Kohlenstoffs. Beim Menschen und den Säugetieren z. B. erscheinen 95% alles ausgeschiedenen Kohlenstoffs in Form von CO_2, beim Blutegel beträgt der Kohlenstoff aus CO_2 nur etwa 60% des Gesamtkohlenstoffs, beim Flußkrebs, der Weinbergschnecke und einem Kieselschwamm (Suberites) nur etwa 40% und bei einzelnen Bakterien sinkt der Anteil der Kohlensäure auf 22% hinab.

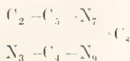
Die Kohlensäure stammt aber keineswegs immer aus Oxydationen, sondern kann auch aus Spaltungen stammen, so daß ihre prozentuale Menge zwar ein Maß für die Menge anderer kohlenstoffhaltiger Endprodukte, aber nicht ohne weiteres ein solches für die Vollständigkeit oder Unvollständigkeit der Oxydationen ist. Der Kohlenstoff, der nicht als CO_2 ausgeschieden wird, kommt zum Teil in Form einer anderen gasförmigen Kohlenstoffverbindung zur Abgabe, als Sumpfgas (Methan CH_4), dessen Auftreten stets auf Spaltungen im Stoffwechsel hinweist. In demselben Sinne spricht das Auftreten von Wasserstoff unter den Endprodukten, der z. B. bei der Buttersäuregärung auftritt. An nicht flüchtigen stickstofffreien Verbindungen kommen Milchsäure, Buttersäure, Alkohol u. a. bei den verschiedensten Organismen weit verbreitet vor.

Die Oxydation des Stickstoffs bis zur Salpetersäure vermögen nur einige wenige

Bakterien durchzuführen (s. oben) und so erscheint der Stickstoff bei der überwiegenden Masse aller Organismen nicht in dieser Form, sondern größtenteils als Ammoniak (NH_3). Bei den Seeanemonen (Actinia) ist außer NH_3 überhaupt kein anderes stickstoffhaltiges Endprodukt nachzuweisen, beim Blutegel erscheinen 60 bis 70% des Stickstoffs als Ammoniak, beim Spulwurm (Ascaris) ca. 33% und etwa ebensoviel beim Flußkrebs (Astacus 28 bis 38%), beim Tintenfisch sind ca. 18,6%, bei der Gans 25% und bei den Säugetieren nur wenige Prozente (Hund 4,3% Ameisenigel 7,5%).

Es könnte hiernach scheinen, als ob mit zunehmender Organisationshöhe die Bildung von Ammoniak immer mehr zurücktrete. Das ist aber nicht der Fall. Auch bei den Säugetieren und Vögeln wird die größte Menge alles Eiweißstickstoffs zunächst als Ammoniak abgespalten, dann aber sekundär in andere Bindung gebracht, indem bei den Säugetieren (sowie den Amphibien und Fischen) in der Leber aus dem Ammoniak Harnstoff [$CO(NH_2)_2$] gemacht wird, bei den Vögeln und Reptilien in demselben Organ Harnsäure (2, 6, 8-Trioxypurin). So beträgt die Summe des Ammoniakstickstoffs und des Harnstoffstickstoffs zusammen beim Hunde 85 bis 95%.

Nächst dem Ammoniak verlangen die verschiedenen Purinderivate als Endprodukte des Stickstoffumsatzes größeres Interesse. Sie leiten sich ab von dem Purinkern N_1—C_6



und zwar sind es besonders Aminopurine und Oxypurine, die sich bei Tieren und Pflanzen finden. Die Purinderivate sind in den Organismen als Bestandteile der Nukleinsäuren enthalten, wobei wohl nur die Aminopurine als normale Bestandteile dieser Säuren anzusehen sind, während die Oxypurine schon die Produkte weiterer Veränderungen der abgespaltenen Aminopurine darstellen.

Zur Ausscheidung gelangen die Abkömmlinge des Purin teils als Aminopurine, z. B. Adenin (6-Aminopurin) und Guanin (2-Amino-, 6-Oxypurin), teils als Oxypurine, nämlich Hypoxanthin (6-Oxypurin), Xanthin (2,6-Dioxypurin) und Harnsäure (2,6,8-Trioxypurin).

Scheidet ein Organismus Purinkörper aus, so ist zunächst zu entscheiden, ob sie aus der aufgenommenen Nahrung stammen (exogene Herkunft), oder ob sie auch bei purinfreier Kost und im Hunger ausgeschieden werden (endogene Purinausscheidung).

Der erstere Fall ist der weniger interessante, da er nur zeigt, daß die betreffenden Organismen, die von außen zugeführte Purinkörper als solche wieder ausscheiden, nicht die Fähigkeit haben, diese Verbindungen weiter zu zerlegen.

Bei der endogenen Purinausscheidung muß in erster Linie die Frage entschieden werden, ob diese Verbindungen aus der Zerlegung der Nukleinsäure stammen oder ob sie aus anderen stickstoffhaltigen Verbindungen erst hergestellt worden sind. Dieses letztere trifft, wie schon erwähnt, bei den Sauropsiden (Reptilien und Vögeln) zu und auch die Purinausscheidung der Insekten ist wohl großenteils auf eine Bildung von Purinderivaten aus Ammoniak zu beziehen. Während nämlich die Maden der Fliege Calliphora bei Fleischkost fast nur Ammoniak als Endprodukt des Stickstoffumsatzes ausscheiden, scheiden die Puppen und Imagines stets Harnsäure in beträchtlicher Menge aus, obgleich sie in Obst und süßen Pflanzensäften eine purinfreie Kost verzehren. Es tritt hier deutlich die neue chemische Fähigkeit der Bildung von Purinen aus Ammoniak mit der Metamorphose auf.

Bei den Säugetieren dagegen, denen diese Fähigkeit fehlt, gibt die Ausscheidung der Purinkörper ein Maß für den Umfang der Zerstörung von Nukleinsäure (und damit von Nukleoproteiden) im Stoffwechsel, denn nur diese Verbindungen enthalten Purine.

Die häufigsten Purine, die zur Ausscheidung kommen, sind das Guanin und die Harnsäure. Ersteres ist bei Plattwürmern (Distoma), Würmern (Capitelliden), beim Flußkrebs und den Spinnen, sowie bei den Mollusken verbreitet, während die Harnsäure bei den Wirbeltieren, den Insekten, Scolopendren und Phalangiden überwiegt.

Bei vielen Tieren kommen mehrere Purinkörper in der Ausscheidung vor, z. B. bei den Schnecken Guanin und Harnsäure, beim Tintenfisch (Octopus) Hypoxanthin neben Harnsäure. Bei den in dieser Hinsicht am genauesten untersuchten Säugetieren finden sich eine ganze Anzahl (meist fünf) Purinkörper in sehr wechselnder Menge.

Außer den am weitesten verbreiteten stickstoffhaltigen Endprodukten des Stoffwechsels, dem Ammoniak und den Purinkörpern, kommen bei Krebsen, Tintenfischen und Blutegeln noch weitere spezifische Verbindungen vor, die aber alle noch ganz ungenügend charakterisiert sind.

Der Schwefel des Eiweiß wird bei Tieren und Pflanzen sowohl in seiner vollständig oxydierten Form, in Sulfaten als auch in organischer Bindung ausgeschieden und der Phosphor erscheint im wesentlichen als

Phosphorsäure, also gleichfalls völlig oxydiert unter den Endprodukten.

4. Der Gesamtstoffwechsel. 4a) Der Anteil der Oxydationen und Spaltungen am Gesamtumsatz. Die Oxydationen und Spaltungen, die wir als die typischen Prozesse des Stoffwechsels kennen gelernt haben, nehmen bei den verschiedenen Organismen einen sehr verschiedenen Anteil am Gesamtumsatz.

Der einfachste Fall ist gegeben, wenn entweder nur Oxydationen oder nur Spaltungen bei einem Lebewesen vorkommen. Daß die Spaltungen allein hinreichen, um alle Funktionen des Stoffumsatzes zu erfüllen, wird durch die Existenz von Organismen bewiesen, die ganz ohne Sauerstoff leben können (s. unten: Leben ohne Sauerstoff), doch stellen diese immerhin Ausnahmen dar. Nicht minder selten sind aber Wesen, die nur durch Oxydationen ihr Stoffwechselmaterial verarbeiten. Es gehören hierhin nur die wenigen Organismen, die höchst einfache Verbindungen oder die Elemente selbst als Oxydationsmaterial verwenden, also vor allem die wenigen Arten von Bakterien, die mit anorganischen Stoffen als einziger Nahrung auskommen (s. oben). Es liegt nahe, von einem rein oxydativen Stoffwechsel da zu sprechen, wo so viel Sauerstoff verbraucht wird, wie zur vollständigen Oxydation der verarbeiteten Stoffe notwendig ist, aber das wäre unrichtig. In solchen Fällen handelt es sich vielfach, z. B. bei allen Wirbeltieren, nur um Fälle, in denen die Spaltungen ausschließlich als Zwischenprozesse auftreten, während sich die Produkte der Spaltung nicht unter den Endprodukten finden.

Wenn z. B. die Stärke im Stoffwechsel eines Wirbeltieres bis zu Kohlensäure und Wasser verbrannt wird, so handelt es sich dabei nicht um eine reine Oxydation, vielmehr finden eine ganze Reihe von Spaltungen statt, in denen aus Stärke, Dextrine darauf Maltose und Dextrose, aus dieser Milchsäure oder eventuell Alkohol und Spaltungskohlensäure entstehen, während die Oxydationen erst an den Produkten der Spaltung angreifen und z. B. Acetaldehyd, Essigsäure, Formaldehyd und endlich Oxydationskohlensäure liefern. Das ist etwas ganz anderes, als wenn ein Bazillus Kohlenoxyd (CO) zu Kohlensäure (CO_2) oxydiert, denn hier ist es wirklich nur eine reine Oxydation, die in einem Schritt vor sich geht und nicht durch Spaltungen eingeleitet wird.

Wir werden in den — am weitesten verbreiteten — Stoffwechseltypen, in denen auf Spaltungen Oxydationen folgen, zwei Kategorien unterscheiden, nämlich die mit vollständiger und die mit unvollständiger Oxydation der Nahrung.

Als vollständig wollen wir die Oxydationen auch dann betrachten, wenn der Stickstoff als Ammoniak ausgeschieden und nicht bis zur Salpetersäure oxydiert ist, was ja nur einige wenige Bakterien vermögen.

Zu den Organismen mit vollständiger Verbrennung der Nahrung gehören sicher die Säugetiere, Vögel und Fische, wahrscheinlich alle Wirbeltiere und wohl auch die Insekten. Wenn ein Mensch von 75 kg Gewicht pro Tag 100 g Eiweiß, 70 g Fett und 600 g Kohlehydrate verarbeitet, so sind zu deren vollständiger Verbrennung 1065 g Sauerstoff nötig, und die direkte Bestimmung des Sauerstoffverbrauchs ergibt, daß in der Tat diese Menge verbraucht wird. Auch bei den Fischen stimmt die Größe des Sauerstoffverbrauchs, die aus dem Verbrauch an Eiweiß, Fett und Kohlehydraten berechnet ist, mit der überein, die unmittelbar bestimmt ist.

Daß diese Vollständigkeit der Oxydationen kein alleiniges Vorrecht der Wirbeltiere ist, lehrt das Vorkommen von Pilzen und Bakterien, die gleichfalls Zucker vollständig zu Kohlensäure und Wasser zu verbrennen vermögen, aber immerhin haben wir es hier mit einem Grenzfall zu tun, und die Mehrzahl der niederen Organismen, die bisher daraufhin untersucht sind, verbraucht weniger Sauerstoff, als zur vollständigen Verbrennung der verarbeiteten Nahrung nötig ist.

Wie groß der Unterschied zwischen dem zur vollständigen Oxydation notwendigen und dem wirklich verbrauchten Sauerstoff ist, mögen einige Beispiele zeigen:

	Sauerstoffmenge, sie zur vollständigen Oxydation nötig wäre	Sauerstoffmenge, die wirklich verbraucht ist
Cucumaria (Seewalze) . . .	252	[illegible]
Weinbergschnecke (Helix) bei 15° .	110	[illegible]
Blutegel (Hirudo) bei 11°	131	42
Flußkrebs (Astacus) bei 14°	130	88

Einen weiteren Einblick in das Verhältnis der Oxydationen zu den Spaltungen ermöglicht unter Umständen das Verhältnis der Menge der produzierten Kohlensäure zum verbrauchten Sauerstoff. Man bezeichnet dies Verhältnis als den „respiratorischen Quotienten" und schreibt ihm $\frac{CO_2}{O}$, wobei die Kohlensäure wie der Sauerstoff in ccm angegeben werden.

Wird ein Nahrungs- oder Körperstoff vollständig oxydiert, so erhält man ein bestimmtes Verhältnis der produzierten Kohlensäure und des verbrauchten Sauerstoffs. Der respiratorische Quotient beträgt z. B. für reine Kohlehydratverbrennung 1,0, für Fett 0,70 und für Eiweiß etwa 0,77. Andere Verbindungen, wie sie für niedere Organismen als Nahrung in Betracht kommen, geben andere respiratorische Quotienten, z. B. beträgt der Wert, der abgekürzt R. Q. geschrieben wird, für Zitronensäure 1,34, für Weinsäure 1,60, für Oxalsäure 4,00, dagegen für Sumpfgas (Methan) nur 0,5. Kennt man die chemische Zusammensetzung des Stoffwechselmaterials, so kann man aus dem respiratorischen Quotienten Schlüsse auf den Anteil der Oxydationen und Spaltungen am Umsatz ziehen. Stimmt der beobachtete Wert des R. Q. mit den oben angegebenen theoretischen Werten überein, so ist die Oxydation vollständig gewesen. Abweichungen des R. Q. von dem Werte der vollständigen Verbrennung haben eine sehr verschiedene Bedeutung.

Ist der R. Q. höher, so schließt man im allgemeinen auch die Beteiligung von Spaltungen an der Bildung der Kohlensäure. Hohe respiratorische Quotienten kommen vielfach bei niederen Tieren vor. Z. B. findet man bei Kieselschwämmen (Suberites) und Seewalzen (Cucumaria) Werte von 2,55 bis 3,8 für den R. Q., während er bei vollständiger Oxydation nur 0,86 bis 0,88 betragen würde. Bei der Weinbergschnecke beträgt bei 2,5° der R. Q. 1,6, während er bei vollständiger Oxydation nur 0,96 sein sollte und ebenso zeigt sich beim Blutegel der Anteil der Spaltungen an der Bildung der Endprodukte.

Man darf aber durchaus nicht jeden hohen R. Q. als den Ausdruck des Hervortretens von Spaltungen auffassen.

Wenn im Stoffwechsel aus einer sauerstoffreicheren Verbindung eine sauerstoffärmere entsteht, so kann der R. Q. hohe Werte erreichen, ohne daß Spaltungskohlensäure unter den Endprodukten vorhanden wäre. Z. B. bei der Mästung der Gans, bei der aus Kohlenhydraten Fett gebildet wird, sind Werte von 1,19 bis 1,34 für den R. Q. beobachtet, während die Kohlenhydrateverbrennung nur R. Q. = 1,0 liefern würde.

Ebenso dürften der hohe R. Q. (2,9) aufzufassen sein, den man erhält, wenn ein Schimmelpilz (Penicillium glaucum) auf Weinsäure wächst. Es wird beim Wachstum aus der Weinsäure der ganze Bestand des Pilzes an Kohlenhydraten, sowie der stickstofffreie Anteil des Eiweiß aufgebaut, d. h. es entstehen aus der Weinsäure sauerstoffärmere Verbindungen, und diese Prozesse erklären den hohen R. Q. von 2,9, wo die vollständige Oxydation der Weinsäure nur einen solchen von 1,6 liefern würde.

Diese Deutung höher respiratorischer Quotienten kommt nur in Frage, wenn Nahrung zugeführt wird, während im Hunger ein hoher R. Q. stets auf Spaltungen hindeutet.

Der andere Fall, daß der R. Q. niedriger ist, als der vollständigen Oxydation entspricht, bedeutet generell, daß die Oxydation der Nahrungs- oder Körperstoffe unvollständig gewesen ist.

Dabei brauchen aber die unvollständigen Oxydationsprodukte nicht ausgeschieden zu werden, sondern können in dem Organismus verbleiben. Dies ist z. B. der Fall bei einer Gruppe von Vorgängen, die als die Umkehrungen der oben erwähnten Bildung von Fett aus Kohlehydraten zu betrachten sind und die seit langem bei der Keimung ölhaltiger Samen bekannt sind. Bei diesen wird nämlich aus Fett Stärke gebildet, wobei Sauerstoff gebunden wird, ohne daß dafür Kohlensäure ausgeschieden würde, und dieser Prozeß kommt in den ungewöhnlichen niedrigen respiratorischen Quotienten dieser Samen zum Ausdruck.

In derselben Weise macht sich die Bildung unvollständig oxydierter Endprodukte geltend. Bei den winterschlafenden Säugetieren z. B., deren R. Q. in wachem Zustande zwischen 0,8 und 0,98 liegen und auf vollständige Oxydation deuten, sinken die Werte im Winterschlaf auf 0,53 bis 0,68 und das gleichzeitige Auftreten von Milchsäure und Aminosäuren im Harn läßt die unvollständige Oxydation leicht erkennen.

Hat man von einem Organismus nur die Kohlensäureproduktion und nicht den Sauerstoffverbrauch, daneben aber die Größe der Wärmeabgabe bestimmt, so kann man aus dem Vergleich dieser letzteren mit der Kohlensäuremenge entscheiden, ob diese aus Oxydationen oder aus Spaltungen stammt.

Wird Zucker verbrannt, so wird für je 1 g Kohlensäure, das dabei entsteht, eine Wärmemenge von 2,55 Kal. frei, entsteht dagegen Kohlensäure aus Spaltungen des Zuckermoleküls, z. B. in einer Buttersäuregärung, so beträgt die Wärmemenge pro 1 g Kohlensäure nur 0,292 Kal.

4b) **Der Anteil von Eiweiß, Fett und Kohlehydraten am Umsatz.** Nicht minder bedeutende Unterschiede wie in bezug auf den Anteil, den die Oxydationen und Spaltungen am Gesamtumsatz nehmen, finden sich für die Beteiligung der wichtigsten Stoffgruppen, der Eiweißkörper, Fette und Kohlehydrate. Wir können von den extremen Fällen ausgehen, in denen im Umsatz eine dieser Stoffgruppen derart überwiegt, daß der Umsatz der übrigen überhaupt nicht

nachweisbar ist, so daß wir von einem reinen Eiweiß-, reinen Fett- oder reinen Kohlehydrasttoffwechsel sprechen können.

Da die Mengen des Stickstoffs und Kohlenstoffs sich im Eiweiß wie 1:3,3 verhalten, so müssen wir bei reinem Eiweißumsatz dieses Verhältnis der beiden Stoffe bekommen, wenn wir die gesamten ausgeschiedenen Mengen vergleichen. Das ist nun tatsächlich beim Blutegel und beim Flußkrebs der Fall, solange die Temperatur nicht über 12 bis 14° steigt. Vielleicht gehört auch der Stoffwechsel im Forellenei hierher.

Da das Eiweiß im Mittelpunkt des biochemischen Geschehens zu stehen scheint, so erscheint es nicht so wunderbar, daß Organismen mit ihm allein ihren Bedarf bestreiten können, eine Fähigkeit, die ja auch für den Hund bekannt ist. Viel auffälliger sind Beispiele, die uns zeigen, daß der Eiweißumsatz bis zur Unmerklichkeit zurücktreten kann, so daß man von einem reinen Kohlehydratstoffwechsel oder einem reinen Fettstoffwechsel reden kann.

Besonders der letztere ist von Interesse, da er in Fällen beobachtet ist, wo Organismen von ihren Reservestoffen zu leben haben, nämlich im Ei, wo das wachsende Hühnchen während der 21 Tage der Bebrütung ausschließlich eine Substanz verbrennt, die einen respiratorischen Quotienten von 0,677 (s. oben) liefert, aus der für 1 g 9,3 bis 9,5 Kal. frei werden, und die auch durch die chemische Untersuchung als Fett charakterisiert ist. Ebenso liegen die Dinge für das Puppenleben einer Fliege (Ophrya cadaverina).

In der Mehrzahl der bekannten Stoffwechseltypen nehmen aber alle drei genannten Stoffgruppen am Umsatz in meßbarer Menge teil, wodurch das Bild wesentlich verwickelter wird, als bei den bisher besprochenen Typen.

Als Maß für die Menge des umgesetzten Eiweiß nehmen wir die Menge des ausgeschiedenen Stickstoffs und erhalten die Zahl für die Eiweißmenge, wenn wir den Stickstoffwert mit 6,25 multiplizierten, da der Stickstoffgehalt des Eiweiß im Mittel 16% beträgt. So scheidet ein Mensch, der mit 70 g Eiweiß im Stickstoffgleichgewicht ist, pro Tag 11,2 g Stickstoff aus.

Bei einer allgemeinen vergleichenden Betrachtung des Eiweißumsatzes, die auch die Pflanzen berücksichtigt, ist aber zu erwägen, daß diese ihre stickstoffhaltigen Endprodukte nicht ausscheiden, sondern mit Hilfe der Kohlehydrate daraus wieder Eiweiß aufbauen, so daß es — hält man sich rein an die Ausscheidung — den Eindruck machen könnte, als hätte die grüne Pflanze überhaupt keinen Eiweißumsatz. Sobald man aber die Pflanzen im Dunkeln hält, so daß sie hungern, ihren Kohlehydratbestand stark reduzieren und daher nicht mehr imstande sind, die Endprodukte des Eiweißumsatzes zu neuem Eiweiß zu verarbeiten, häufen sich diese Produkte in den Pflanzen an und zeigen auch bei ihnen eine lebhafte Beteiligung dieser wichtigen Stoffgruppe am Umsatz.

Hat man aus der Gesamtheit der Stoffwechselvorgänge den Eiweißumsatz ausgesondert, so bleibt zu entscheiden, in welchem Verhältnis nunmehr noch Kohlehydrate und Fette umgesetzt werden. Eine generelle Methode zur Lösung dieser Aufgabe haben wir nicht, nur wenn wir festgestellt haben, daß ein Organismus Kohlehydrate und Fette vollständig verbrennt, können wir aus dem respiratorischen Quotienten R. Q. (s. oben) erkennen, in welchem Verhältnis sie umgesetzt worden sind. Der R. Q. für reinen Kohlenhydratumsatz ist 1,00, für reinen Fettumsatz 0,7 und es läßt sich aus jedem dazwischen liegenden Wert leicht berechnen, welchem Mischungsverhältnis beider Stoffe er entspricht.

Eine Mischung gleicher Teile beider Stoffe gibt z. B. einen R. Q. = 0,85.

4c) Die Intensität des Stoffwechsels Die große qualitative Gleichartigkeit der Vorgänge des Stoffwechsels bei Protisten, Pflanzen und Tieren der verschiedensten Stämme legt die Frage nahe, ob auch in der Intensität des Umsatzes, in der Geschwindigkeit, mit der Nahrungsstoffe oder Körperstoffe im Betriebsstoffwechsel verarbeitet oder im Baustoffwechsel zu neuer lebendiger Substanz umgestaltet werden, derartige Gleichartigkeiten aufzufinden sind. Um dieser Frage näher treten zu können, ist es in erster Linie nötig, die Intensität des Stoffwechsels zu messen.

Da die verschiedenen Lebewesen die aller verschiedensten Stoffe als Stoffwechselmaterial verwenden, so geht es nicht an, das Gewicht der umgesetzten Stoffe als Vergleichsmaß zu nehmen: wenn ein Organismus 1 g Fett, ein anderer 1 g Weinsäure, oder einer 1 g Eiweiß, ein anderer 1 g Glycerin umgesetzt hat, so haben sie ganz verschiedenes geleistet. Um den Umsatz trotzdem zu vergleichen, können wir von der Erwägung ausgehen, daß — wenigstens bei der Mehrzahl der Organismen — die umgesetzten Stoffe mehr oder weniger vollständig oxydiert worden sind, wozu eine bestimmte Menge Sauerstoff nötig ist (s. oben Sauerstoffkapazität). Da der Brennwert des Sauerstoffs (s. oben) bei der Mehrzahl der Verbindungen, die als Nahrung in Betracht kommen, fast derselbe ist, so gibt uns die Größe des Sauerstoffverbrauches auch gleichzeitig ein Maß für die Energiemenge, die für den Organismus nutzbar

geworden ist, und so werden wir ihn als ein gutes Maß für die Intensität des Umsatzes der meisten Organismen ansehen dürfen. Zu vergleichen, wieviel ein Exemplar einer Art pro Stunde verbraucht, wird dabei kein Interesse haben, da ja die Gewichte der Einzelindividuen von millionstel Milligrammen bis zu Tausenden von Kilogrammen variieren und es liegt nahe und ist üblich geworden, als Vergleichsgewicht 1 kg Lebendgewicht zu nehmen. Aber auch 1 kg Lebendgewicht verschiedener Tiere und Pflanzen bedeutet noch recht verschiedenes, da der Wassergehalt große Unterschiede zeigt. Während er bei den meisten Tieren und Pflanzen 80 bis 85% beträgt, gibt es Arten — besonders unter den Planktontieren — die mehr als 96% Wasser, 3,6% Salze und nur 0,2 bis 0,3% organischer Substanz enthalten, so daß 1 kg eines solchen Tieres vielleicht nur $^1/_{60}$ bis $^1/_{80}$ der Menge organischer Substanz enthält, wie ein Landtier, oder überhaupt die Mehrzahl der höheren Tiere und Pflanzen. Wir wollen aber den Umsatz in Vergleich zu dem Bestande an organischen Stoffen setzen, und so werden wir als Vergleichseinheit 1 kg organischer Substanz (bei 100° getrocknet) nehmen müssen. Der Wert, von dem wir bei der Vergleichung ausgehen, ist also die Menge Sauerstoff, welche 1 kg organischer Trockensubstanz in einer Stunde verbraucht.

Sauerstoffverbrauch einiger Organismen.

Objekt	Gewicht eines Tieres g	Temperatur °C	Verbrauch pro kg org. Substanz und Stunde in g
Cucumaria (Seewalze)	15	18,7	0,113
Murex (Purpurschnecke)	9	23,0	0,480
Salpa tilesii (Seetönnchen)	80	16,0	0,560
Octopus (Tintenfisch)	7,1	16,0	1,060
Cestus (Venusgürtel)	73	16,0	1,58
Scorpaena (Drachenkopf)	18	31,5	2,08
Palaemon (Garneele)	0,95	23,5	3,45
Rhizostoma (Qualle)	232	26,0	4,40
Meerschweinchen	445	38,0	5,68
Ente	1740	40,0	8,00
Calanus (Kleinkrebs)	0,00073	17,7	23,80
Collozoum (Radiolar)	0,1	16,0	27,7
Maus	19	37,0	30,5
Grünfink	25	40,0	45,4
Bierhefe	—	29,0	236,0
Kahmpilz	—	26,0	772,0
Bacillus fluorescens liquefaciens	—	22,0	26000,0

Die Zusammenstellung einiger Zahlen dieses Wertes zeigt auf den ersten Blick keinerlei Gleichartigkeit, sondern nur die allergrößten Unterschiede. So verbraucht ein Seewalze (Cucumaria) nur wenig mehr wie $^1/_{10}$ g, während der Bazillus, der am Ende der Reihe steht, 26000 g verbraucht, d. h. 230000mal so viel. Zwischen diesen Extremen finden sich alle möglichen Uebergänge: Formen, die ein oder einige Gramm verbrauchen, solche, bei denen der Umsatz 20, 30, 40 g beträgt, wieder andere, die mehrere hundert Gramm umsetzen, so daß wir eine kontinuierliche Reihe von den niedrigsten zu den höchsten Werten des Sauerstoffverbrauchs konstruieren können. Die Werte des Sauerstoffverbrauchs sind nicht alle bei derselben Temperatur bestimmt, und da, wie wir sehen werden (s. u.), die Temperatur einen sehr bedeutenden Einfluß auf die Intensität des Umsatzes in der lebendigen Substanz hat, liegt es nahe, hierin ein Moment für die große Verschiedenheit der Werte zu vermuten. Der Einfluß der Temperatur ist aber viel zu gering, um so gewaltige Unterschiede erklären zu können, wie wir sie in der Größe des Sauerstoffverbrauches kennen. Würden wir die erwähnten extremen Werte auf dieselbe Temperatur von 22° umrechnen, so würde die Seewalze doch nur etwa 0,16 g verbrauchen, d. h. es blieben immer noch Unterschiede wie 1 : 163000 bestehen.

Ein Analogon aus der unbelebten Natur zeigt uns die Richtung, in der wir zu suchen haben, um Einheitlichkeit in diese Werte zu bringen: Ein Stück Steinkohle brennt schwer an und langsam erfolgt die Verbrennung des ganzen Stückes, wird aber die Steinkohle gepulvert, so haben wir in dem Gemisch von Kohlenstaub und Luft ein sehr gefährliches explosibles Gemisch. Ebenso verhalten sich kompakte Massen von Mehl gegenüber Mehlstaub. Der chemische Vorgang der langsamen Verbrennung von Kohle und der explosionsartig raschen Verbrennung von Kohlenstaub ist ganz derselbe, nur die Geschwindigkeit ist sehr verschieden, und zwar ist sie um so größer, je größer die Oberfläche ist, mit der die Kohle an die Luft grenzt. Z. B. bietet ein Würfel Kohle von 10 cm Seitenlänge nur eine Fläche von 600 cm², dieselbe Kohlenmenge in Staub verwandelt, dessen Körnchen, die wir uns auch würfelförmig denken wollen, 0,01 mm Seitenlänge haben sollen, bietet der Luft eine Fläche von 600 m², d. h. eine 10000mal größere Fläche, und in diesem Verhältnis ist die Geschwindigkeit der Verbrennung erhöht.

Wir gingen bei der Vergleichung der Stoffwechselintensität verschiedener Organismen von der Menge Sauerstoff aus, die 1 kg Trockensubstanz in der Zeiteinheit verbraucht. Die Flächen, durch welche diese Substanzmenge mit dem Sauerstoff der Luft bezw. des Wassers in Beziehung tritt,

sind außerordentlich verschiedene und zwar sind sie im allgemeinen um so größer, je kleiner die Organismen sind. Der Mensch repräsentiert ca. 20 kg organische Trockensubstanz und da die Fläche, durch welche der Sauerstoff aufgenommen wird, bei ihm etwa 80 m² beträgt, so entfällt auf 1 kg eine Fläche von 4 m², von den kleinsten Organismen sind ungeheuere Zahlen von Individuen nötig, um 1 kg organische Substanz zu liefern, die eine gewaltige Fläche besitzen, z. B. würden von einem Coccus von 1 μ Durchmesser und ca. 0,5 μ^3 Inhalt, der 3,14 μ^2 Oberfläche hat, 10^{16} Zellen nötig sein, um 1 kg organische Substanz zu liefern und diese würden eine Fläche von 30000 m² repräsentieren.

Wenn zwei Körper einander geometrisch ähnlich sind, und ihre Längen sind l und L, so verhalten sich ihre Gewichte wie $l^3 : L^3$, ihre Flächen wie $l^2 : L^2$ und das Verhältnis der Fläche zum Inhalt wird ausgedrückt durch die Werte $\frac{l^2}{l^3} : \frac{L^2}{L^3} \quad \frac{1}{l} : \frac{1}{L}$.

Das bedeutet, daß die Größe der Fläche, welche auf eine gewisse Masse entfällt, umgekehrt proportional der Länge der Körper ist.

Wenn bei den Organismen eine Beziehung der Intensität des Umsatzes zur Größe der sauerstoffaufnehmenden Flächen besteht, so könnten wir erwarten, daß der Umsatz pro Masseneinheit um so größer ist, je kleiner die Tiere sind.

Das trifft in der Tat in vielen Fällen zu. Z. B. bei einem Fisch (Heliastes chromis) bestehen folgende Beziehungen bei verschieden großen Individuen: Wenn sich die Längen verhalten wie 1 : 2,17 : 4,12, die Massen wie 1 : 10,1 : 70,0 und die Flächen wie 1 : 4,68 : 17,0, so beträgt das Verhältnis des Sauerstoffverbrauchs der Tiere 1 : 5 : 21,6, d. h. es stimmt nahe überein mit dem Verhältnis der Quadrate der Längen. Dasselbe gilt für Salpen und für den Frosch. Aber diese Beziehung des Umsatzes zur absoluten Größe ist keine generelle. Bei Kieselschwämmen (Suberites massa) ist der Sauerstoffverbrauch pro Gewichtseinheit unabhängig von der absoluten Größe, kleine und große Stücke brauchen pro Kilogramm organische Trockensubstanz und Stunde gleich viel.

Gerade diese scheinbare Ausnahme aber zeigt, daß wir auf dem rechten Wege sind, wenn wir eine Beziehung der Intensität des Umsatzes zur Größe der Stoffaustauschflächen suchen, denn bei den Schwämmen verhalten sich die Flächen des Sauerstoffaustausches anders als bei den vorhergenannten Tieren. Die Flächen, durch welche die Schwämme mit dem sauerstoffhaltigen Wasser in Berührung treten, werden von einem äußerst feinen System von Kanälen mit kleinen Geißelkammern gebildet, durch die das Wasser strömt. Diese Kanälchen sind bei großen und kleinen Schwammstücken gleich fein, d. h. auf 1 cm³ des Schwammes entfällt stets dieselbe Fläche, die Flächen verhalten sich hier ebenso wie die Massen und wenn überhaupt eine Beziehung zwischen Flächenentwickelung und Stoffwechselintensität besteht, so war für die Schwämme zu postulieren, daß bei ihnen der Umsatz pro Masseneinheit für große und kleine Stücke derselbe sein müßte, was die direkte Bestimmung bestätigt hat.

Bei den Insekten scheinen prinzipiell ähnliche Verhältnisse vorzuliegen, doch fehlt es hier an näheren Untersuchungen.

Eine allgemeine Vergleichung der Intensität des Umsatzes muß sich also auf die Flächen der Stoffaufnahme beziehen. Bei Bakterien, Pilzen, Protisten, bei denen die gesamte Körperfläche der Sauerstoffaufnahme dient, ist diese Fläche aus der geometrischen Form der Organismen unschwer zu berechnen, bei Formen mit besonderen Atmungsorganen, Kiemen oder Lungen, müssen deren Flächen besonders bestimmt werden.

Wie sich eine solche Vergleichung stellt, zeigen die Zahlen der folgenden Tabelle.

	Sauerstoffverbrauch	
	pro kg organ. Subst. Stunde in g	pro m² Fläche u. Stunde mg
Bacillus fluorescens liquefaciens	26,000	500
Kahmpilz	772	130
Hefe	230	42
Collozoum	27,7	110
Aplysia	0,53	260
Murex	0,48	340
Dromia	0,67	375

Während die Unterschiede des Umsatzes bezogen auf die Einheit der Masse das 54000fache betragen, kommen beim Vergleich auf die Einheit der Fläche höchstens solche von 1 : 12 vor, und die beiden Werte, die auf die Einheit der Masse berechnet um das 54000fache verschieden sind, zeigen beim Vergleich mit der Fläche nur Unterschiede wie 1 : 1,46.

Jedenfalls lehrt diese Uebersicht, daß bei einer Vergleichung, die die Einheit der Fläche als Vergleichsgröße nimmt, gewaltige Unterschiede schwinden, die bei der Berechnung auf die Einheit der Masse vorhanden sind, daß aber andererseits auch die Einheit der resorbierenden Fläche durchaus nicht bei allen Organismen dieselbe

Menge Sauerstoff in der Zeiteinheit durchtreten läßt. Es ist ohne weiteres zu erwarten, daß die Menge Sauerstoff, die durch einen Quadratmeter der resorbierenden Flächen in einer Stunde hindurchtritt, nicht für alle Organismen konstant sein kann.

Zunächst ist zu berücksichtigen, daß der Sauerstoffverbrauch desselben Organismus innerhalb weiter Grenzen schwanken kann, so daß es willkürlich erscheinen könnte, welchen Wert man einer Vergleichung zugrunde legen soll. Eine einfache Ueberlegung zeigt aber, daß ein Wert unbedingt den Vorzug verdient, nämlich der maximale Umsatz, dessen ein Organismus fähig ist, denn wir wollen ja wissen, ob die Leistungsfähigkeit der sauerstoffaufnehmenden Flächen überall dieselbe ist, bezw. welche Unterschiede sich in dieser Hinsicht finden. Aber auch wenn wir die maximalen Werte vergleichen, bekommen wir große Differenzen. Beim Blutegel z. B., der keine besonderen Atmungsorgane hat, sondern nur durch die Haut seinen Sauerstoff aufnimmt, beträgt die höchste (beobachtete) Leistung pro m^2-Stunde 263 mg, das ist etwa ein Viertel der Menge, die die menschliche Lunge pro m^2-Stunde im Maximum aufnehmen kann. Noch geringer ist die Leistung der menschlichen Haut in bezug auf die Sauerstoffresorption. Die Hautatmung beträgt beim Menschen 0,58% der Sauerstoffmenge, die bei Muskelruhe verbraucht wird, d. h. die ganze Haut des Menschen resorbiert pro Minute etwa 1,4 ccm Sauerstoff. Wenn wir aber bedenken, daß die Lunge eine Fläche von 80 bis 90 m^2 hat, die Haut aber nur eine solche von 1,7 m^2, so werden die Unterschiede der Leistung pro Flächeneinheit wesentlich geringere. Es tritt bei Muskelruhe durch 1 m^2 Lunge 3,5 mal so viel Sauerstoff, als durch das gleiche Flächenstück der Haut. Während aber die Lunge ihre Leistung noch etwa auf das Vierfache steigern kann, nimmt bei steigendem Sauerstoffverbrauch die Hautatmung nicht zu, so daß bei stärkster Beanspruchung die Lunge pro Flächeneinheit etwa 15 mal so viel leistet als die Haut.

Die Bedingungen für diese Verschiedenheiten der Leistung pro Flächeneinheit werden wir in der physikalisch-chemischen Beschaffenheit und in der absoluten Dicke der Oberflächenschichten und Membranen sehen, die die verschiedenen sauerstoffaufnehmenden Flächen bedecken. Bei den Wirbeltieren grenzen die Oberflächen der Lungen und Kiemen, mit feuchten Flächen, die durch keine besonderen Membranen geschützt sind, an die Luft, bezw. an das Wasser und hier können wir einen Wert für die Sauerstoffaufnahme pro Flächeneinheit angeben, der unter keinen Umständen überschritten werden kann. Wenn die Fähigkeit, Sauerstoff zur Oxydation von Nahrungsstoffen zu verwenden, bei diesen Tieren auch noch so groß ist, so können sie sich doch niemals mehr Sauerstoff wirklich zugänglich machen, als in die dünne Flüssigkeitsschicht, die die lebenden Elemente bedeckt, in der Zeiteinheit hineindiffundieren kann. Die Zellen können diese dünne Schicht stets praktisch frei von Sauerstoff halten, und die Geschwindigkeit ihres Sauerstoffverbrauchs ist dann bestimmt durch die Diffusionsgeschwindigkeit des Sauerstoffs in Wasser und durch den Partiardruck dieses Gases, in dem respiratorischen Medium (der Alveolenluft der Lungen oder des Wassers, das an den Kiemen vorbeiströmt). Bei dem Sauerstoffdruck von 160 mm Quecksilber, der in der Atmosphäre herrscht, beträgt dieser Grenzwert etwa 1,5 g pro m^2-Stunde, ein Wert, der in dem Maße unsicher ist, wie die Zahl für den Diffusionskoeffizienten des Sauerstoffs. In der Tat erreichen die Wirbeltiere anscheinend alle bei maximaler Stoffwechselintensität diese physikalische Grenze, die der Geschwindigkeit der physiologischen Verbrennung gesteckt ist, d. h. bei maximalem Umsatz ist der Sauerstoffverbrauch aller Wirbeltiere pro Quadratmeter der Lungen- oder Kiemenfläche konstant.

Bei den Krebsen sind alle Flächen, und so auch die der Sauerstoffaufnahme, mit Chitinmembranen bedeckt, und die maximale Umsatzgröße hängt bei ihnen von der Diffusionsgeschwindigkeit des Sauerstoffs durch (wasserreiches) Chitin ab, eine Geschwindigkeit, die wir nicht kennen.

Da bei verschieden großen Krebsen aber die absolute Dicke dieser Membranen eine sehr verschiedene ist, so wird die Leistung pro Flächeneinheit recht verschieden sein müssen. Wenn wir bedenken, daß die Chitinbedeckung des ganzen Körpers bei Kleinkrebsen sicher nicht dicker ist als die relativ dünnen Membranen, welche die Kiemen großer Krebse bedecken, so wird es uns nicht wundernehmen, wenn die Hautatmung kleiner Krebse pro Flächeneinheit ebensoviel leistet, wie die Kiemenatmung großer Formen.

Einen besonders starken Einfluß auf die maximale Menge Sauerstoff, die durch die Flächeneinheit hindurchtreten kann, scheint der Gehalt der Oberflächenschichten an fett- oder wachsartigen (lipoiden) Stoffen zu haben. Die geringe Leistung der menschlichen Haut, die mit einer Reihe lipoider Stoffe imprägniert ist, dürfte hierauf zurückzuführen sein. Da Spezialuntersuchungen fehlen, ist nicht mit Sicherheit zu sagen, ob der relativ (zur Oberfläche)

sehr langsame Stoffwechsel der Schwämme, die als reich an lipoiden Substanzen bekannt sind, hier als Beispiel erwähnt werden darf, ebenso der der Tuberkelbazillen, vieler Milben und Läuse, die einerseits lipoidreich sind und bei denen andererseits der Umsatz im Vergleich zur absoluten Größe auffallend gering erscheint.

Daß diese Ausführungen, nach denen die physikalischen Bedingungen der Sauerstoffresorption die Intensität des Stoffwechsels begrenzen, keine ganz allgemeine Anwendung auf alle Organismen finden können, geht schon daraus hervor, daß es Lebewesen gibt, die überhaupt keinen Sauerstoff brauchen, die ohne Sauerstoff leben. Aber auch bei den Organismen, welche Sauerstoff aufnehmen, ist es nicht stets unbedingt seine Menge, die die Intensität des Stoffwechsels bestimmt. Wir können uns Organismen denken, bei denen die Menge irgendeines anderen Stoffes, der resorbiert wird, früher an die physikalische Grenze der Aufnahmemöglichkeit kommt als der Sauerstoff, und bei den Wesen, die ohne Sauerstoff leben, wird die Intensität ihres Stoffumsatzes auf alle Fälle durch derartige Bedingungen begrenzt. Allgemeines läßt sich hierüber zurzeit nicht sagen.

4d) Das Verhältnis von Bau- und Betriebsstoffwechsel. Es war in den vorhergehenden Abschnitten eine scharfe Trennung zwischen den Prozessen gemacht, die zur Bildung neuer lebendiger Substanz führen (Baustoffwechsel) und jenen, die Energie liefern (Betriebsstoffwechsel) und für das Verständnis der Stoffwechselprozesse ist es nötig, diese Scheidung scharf durchzuführen. Es darf aber die Art der Darstellung nicht zu der Auffassung verleiten, als seien Bau- und Betriebsstoffwechsel zwei Komplexe von Vorgängen, die unbeeinflußt nebeneinander herliefen, vielmehr bestehen tatsächlich sehr enge Beziehungen zwischen beiden.

Die Energie, welche im Betriebsstoffwechsel frei wird, dient sehr verschiedenen Leistungen; sie kann in mechanische Energie, in Licht oder Elektrizität umgewandelt werden, kann in der chemischen Energie der Sekrete zur funktionellen Verwendung gelangen und kann endlich dazu dienen, neue lebendige Substanz von spezifischer Struktur aufzubauen. Dieser letztere Anteil der gesamten Betriebsenergie steht also in unmittelbarster Beziehung zum Baustoffwechsel.

Wie es nun für die gesamten Energieumwandlungen eine wichtige Frage ist, mit welchem Nutzeffekt die Energie in ihnen verbraucht wird (s. allgemeine Energetik der Organismen), so ist für das Verhältnis von Bau- und Betriebsstoffwechsel die Frage fundamental, wieviel Energie aufgewandt werden muß, um eine bestimmte Menge neue organische Substanz aufzubauen.

Für eine Anzahl von Pilzen hat Pfeffer einen Wert angegeben, der nahezu das bedeutet, wonach wir hier fragen. Er bezeichnet als „ökonomischen Koeffizienten" die Menge trockener Pilzernte, die man erhält, wenn 100 g Nahrung verwendet werden. Da nun der Energiegehalt der Nahrung, der Grad der Ausnutzung dieser Energie im Stoffwechsel verschiedener Organismen und auch der Brennwert der neu aufgebauten Substanz nicht bei allen Lebewesen gleich sind, so wird es sich empfehlen, die Vergleichung so zu gestalten, daß man angibt, wieviel Betriebsenergie in der Zeit umgesetzt wird, in der diejenige Menge neuer organismischer Substanz aufgebaut wird, die einen Brennwert von 1 Kal. hat.

Es liegen noch nicht sehr zahlreiche Untersuchungen über diesen Gegenstand vor.

Am niedrigsten ist die fragliche Energiemenge bei der Entwickelung des Hühnchens, des Seidenspinners und bei der Metamorphose der Fliege Ophrya cadaverina von der Puppe zum Imago. Bei der Entwickelung im Hühnerei werden im ganzen 59 Kal. umgesetzt. Von diesen erscheinen 38 Kal. in der Leibessubstanz des Hühnchens, nur 21 werden als Wärme abgegeben. Um 1 Kal. Hühnchen aufzubauen, waren also nur 0,56 Kal. nötig. In den beiden anderen Fällen ist der Wert fast derselbe, nämlich für die Entwickelung des Seidenspinners 0,55 und bei der Fliege 0,528 Kal. In diesen Fällen handelt es sich um die Verwendung arteigener Stoffe, und es werden während der Zeit der Entwickelung kaum mechanische Leistungen vollbracht.

Werden artfremde Nährstoffe zugeführt, so ist nach den bisherigen Erfahrungen die Menge Betriebsenergie, die aufgewandt werden muß, um Substanz im Brennwert von 1 Kal. zu bauen, stets größer als 1. Dabei bestehen große spezifische Unterschiede. Z. B. beträgt die Zahl für den Milzbrandbazillus 1,04, für den Schimmelpilz Aspergillus auf Zucker 1,08, für den Diphtheriebazillus 7,3 und für Typhus 7,65. Bei derselben Spezies zeigt das Verhältnis von Bau und Betrieb Unterschiede je nach der chemischen Beschaffenheit der Nahrung. Während der genannte Aspergillus z. B. auf Zucker 1,08 Kal. braucht, sind auf Glycerin 4,08 zu derselben Leistung nötig. Auch die Konzentration der Nährstoffe spielt eine bedeutende Rolle. Während z. B. für einen Pilz bei einer Zuckerkonzentration von 0,726% das Verhältnis 2,73 betrug, betrug es bei 11,86% Zucker schon 11,4 und bei 23,70% gar 22,60.

Der Nutzeffekt der Nahrung beim Aufbau neuer organismischer Substanz sinkt hier mit steigender Konzentration. Andererseits sinkt auch bei stärker abnehmender Konzentration dieser Wert, er hat also bei einer bestimmten Konzentration ein Optimum.

Bei rein oxydativem Stoffwechsel ist der Nutzeffekt im Anbau neuer Substanz nicht notwendig günstiger als bei reinem Spaltungsstoffwechsel.

So baut das anaerobe Clostridium pasteurianum, das Luftstickstoff bindet (s. oben) ca. 27 mg organische Substanz mit 120 Kal. Brennwert auf, für je 1 g Zucker, das verarbeitet wird. Da aber dieser Zucker in einer Buttersäuregärung verarbeitet wird, d. h. für 1 g nur 138 Kal. frei werden, so beträgt der Aufwand an Betriebsenergie nur 1,15 Kal. für 1 Kal. in Form von Bakterienleibern, also nicht mehr, wie bei Pilzen, die aerob leben, oder bei anderen Bakterien.

5. Die Wirkung veränderter Bedingungen auf den Stoffwechsel. Der Ablauf der Stoffwechselvorgänge, die in ihrem allgemeinen Verhalten dargestellt worden sind, verändert sich unter der Wirkung einer Reihe von äußeren Bedingungen in sehr charakteristischer Weise. Es sollen hier als wichtigste Faktoren solcher Veränderungen die Temperatur, das Licht und die Konzentration der notwendigen Stoffe behandelt werden. Zu dem letzteren Fall gehören als Grenzfälle der völlige Mangel an Nahrungsstoffen (der Hunger) und die vollständige Entziehung des Sauerstoffs (die Anaerobiose).

5a) Temperaturwirkungen. Die Erfahrungen der Chemie haben gelehrt, daß jede chemische Reaktion in der Geschwindigkeit ihres Ablaufes in hohem Maße von der Temperatur abhängig ist und zwar wächst, wie van 't Hoff gezeigt hat, die Geschwindigkeit auf das 2 bis 3fache, wenn die Temperatur um 10° erhöht wird. Es ist in der biologischen Literatur üblich geworden, die Zahl, welche die Beschleunigung für 10° Temperatursteigerung angibt, als Q_{10} zu bezeichnen. Die Enzymreaktionen, die im Mechanismus des Lebens eine so große Rolle spielen, folgen diesem Gesetz der Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit sehr gut. So beträgt Q_{10} für die Invertase der Hefe nahezu 3. Es tritt aber bei allen biologischen Reaktionen eine Besonderheit auf. Da die Enzyme bei höheren Temperaturen zerstört werden, so steigt die Wirkung, die eine bestimmte Menge Enzym in bestimmter Zeit ausübt, nur bis zu einer gewissen Temperatur an, um dann steil abzufallen. Für die Invertase z. B. ist bis gegen 50° hin die Uebereinstimmung zwischen der theoretischen Kurve und der tatsächlichen Wirkung sehr gut, bei 60° aber erreicht die Wirkung schon ihr Maximum, um bei ca. 67° gänzlich aufzuhören. Da in diesem Falle das Gesetz bekannt ist, nach welchem das Ferment bei hoher Temperatur zerstört wird, so läßt sich zeigen, daß in der Tat die Wirkung gleicher Fermentmengen bis zur Grenze der Wirksamkeit hin in der Weise ansteigt, wie es die van't Hoffsche Regel erfordert. Figur 4

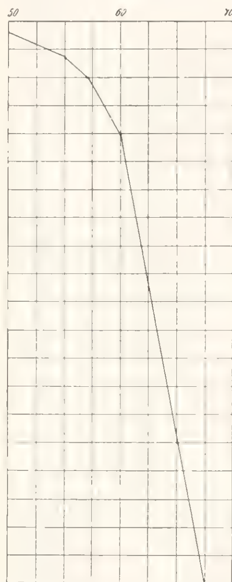


Fig. 4. Zerstorung der Invertase durch Temperaturen zwischen 50 und 70° C.

und 5 zeigen, wie das Ferment oberhalb 50° zerstört wird, und wie sich hieraus der tatsächliche Verlauf der Reaktion bei hoher Temperatur erklärt.

Die Unterschiede der einzelnen Fermentreaktionen in bezug auf die Temperaturwirkung liegen in zwei Richtungen: einmal sind die oberen Temperaturgrenzen, bis zu denen die einzelnen Fermente wirken, recht verschieden, und andererseits ist der Faktor Q_{10}, der Grad der Beschleunigung durch Temperaturerhöhung, für die verschiedenen Reaktionen durchaus nicht immer derselbe. Wenn eine einzelne chemische Reaktion innerhalb weiter Temperaturgrenzen denselben Faktor Q_{10} hat, so ist für den Gesamtumsatz eines Organismus, der sich ja aus einer Fülle verschiedener Reaktionen zusammensetzt, zunächst nicht zu erwarten,

daß es auch hier gelingen würde, konstante Faktoren der Beschleunigung zu finden. Wenn dies trotzdem in vielen Fällen gelingt, so muß man sich ein Prinzip gegenwärtig

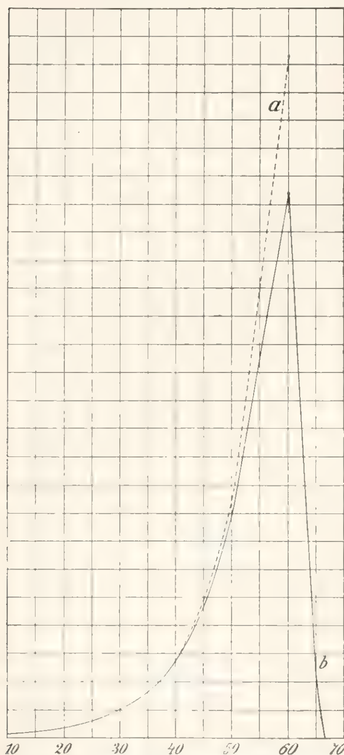


Fig. 5. Kurve der Umsatzgeschwindigkeit bei steigender Temperatur. a theoretischer Verlauf für $Q_{10} = 2,8$, b wirklicher Verlauf für Fermentreaktionen.

halten, das man als das „Prinzip des langsamsten Vorganges" bezeichnen kann, und dessen Erkenntnis wichtig für das Verständnis des Mechanismus der Vorgänge in der lebendigen Substanz ist. Dies Prinzip sagt für den Fall der Temperaturwirkung aus, daß bei einer Reihe von Prozessen, die gegenseitig voneinander abhängig sind, die Form des Gesetzes, nach dem die Temperatur wirkt, bestimmt ist, durch den langsamsten Vorgang, analog dem Prinzip, daß die Leistungsfähigkeit eines Mechanismus durch seinen schwächsten Teil bestimmt ist. Wenn die Wirkung der Temperatur innerhalb weiter Grenzen untersucht wird, so besteht die Möglichkeit, daß bei niedrigen Temperaturen ein anderer Prozeß der langsamste ist, als bei höheren, und in diesem Falle erhält die Kurve, die die Abhängigkeit der Lebensprozesse von der Temperatur darstellt, einen Knick.

Die Erfahrung, daß eine Reihe genauer untersuchter Teilprozesse der Organismen bei niederen Temperaturen einen sehr hohen Wert für Q_{10} ergeben, während oberhalb einer bestimmten Temperatur normale Werte erhalten werden, d. h. Werte, die zwischen 2 und 3 liegen, findet ihre Erklärung in der angedeuteten Weise.

Welche Werte von Q_{10} z. B. für den Sauerstoffverbrauch und die Kohlensäureproduktion beobachtet sind, zeigt die kleine Zusammenstellung, die noch erheblich vermehrt werden könnte.

Temperaturkoeffizienten für mittlere Temperaturen

Objekt	für Kohlensäureproduktion Q_{10}	für Sauerstoffverbrauch Q_{10}
Colpidium	1,93	2,00
Regenwurm (Lumbricus)	1,92	1,90
Weinbergschnecke (Helix)	2,13	2,50
Blutegel (Hirudo) . .	2,40	2,60
Erbse (Pisum sativum)	2,6	
Weizen (Triticum vulgare)	2,3	

Den Verlauf einer Kurve des Sauerstoffverbrauchs bei verschiedenen Temperaturen zeigt Figur 6 für den Flußkrebs.

Die einzelnen Teilprozesse des Stoffwechsels haben nicht stets denselben Temperaturkoeffizienten, z. B. gelten beim Blutegel zwischen 18 und 24° folgende Werte:

für Sauerstoffverbrauch .... $Q_{10} = 2,85$
für Kohlensäureproduktion .. $Q_{10} = 3,40$
für Stickstoffausscheidung .. $Q_{10} = 1,50$

Schon hieraus ergibt sich, daß abgesehen von der Veränderung der Geschwindigkeit auch die Qualität der Stoffwechselvorgänge durch die Temperatur verändert werden. Es ändert sich der Anteil, den Eiweiß, Fette und Kohlehydrate am Gesamtumsatz nehmen, es ändert sich auch der Anteil der Oxydationen und Spaltungen. Für den ersten Punkt mag der Blutegel als Beispiel dienen, der bei niederer Temperatur einen reinen Eiweißstoffwechsel hat, während mit steigender Temperatur immer mehr der

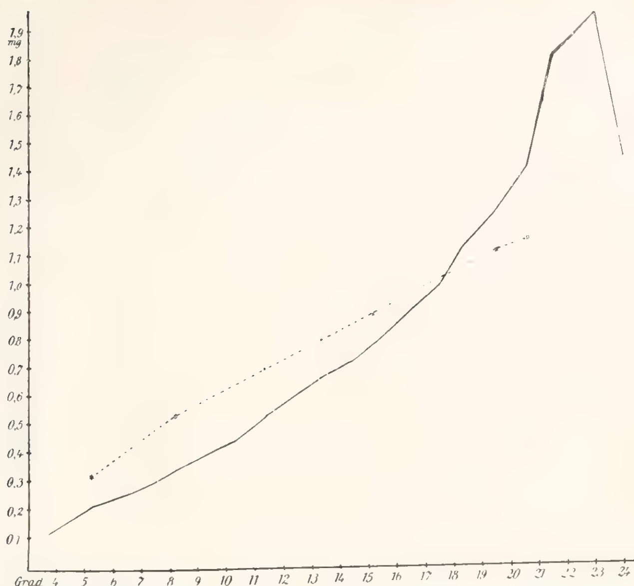


Fig. 6. Sauerstoffverbrauch des Flußkrebses pro Tier und Stunde. Abszissen: Temperatur. Ordinaten: Sauerstoffverbrauch in Milligrammen (ausgezogene Linie), bezw. Logarithmen der Sauerstoffverbrauchswerte (punktierte Linie). Nach Brunow.

Umsatz der Kohlehydrate in den Vordergrund tritt. Daß der Anteil der Oxydationen und Spaltungen am Gesamtumsatz durch die Temperatur beeinflußt wird, zeigt häufig die Veränderung der respiratorischen Quotienten (s. o.) R. Q. als Funktion der Temperatur. So beträgt der R. Q. für die Hefe bei 0° 0,87, bei 26,0° 1,90 und bei 46,3° sogar 4,50, d. h. hier treten mit steigender Temperatur die Spaltungen immer mehr in den Vordergrund. Umgekehrt ist es für die Weinbergschnecke, bei der der R. Q. bei 2,5° 1,6, bei 8,0° nur 1,3 und bei 18,0° 0,95 bis 1,0 beträgt.

Im Baustoffwechsel gestalten sich die Temperaturwirkungen etwas anders. Für die Prozesse des Wachstums und der Entwickelung gibt es für alle Organismen eine untere Grenze, die höher liegt als die untere Grenze der Lebensfähigkeit und des Betriebsstoffwechsels. So produzieren Lupine und Weizen bei 2° noch nennenswerte Mengen Kohlensäure im Betriebsstoffwechsel, während das Temperaturminimum für die Keimung zwischen 0 und + 4,8° liegt. Die Minimaltemperatur für die Keimung oder Entwickelung ist eine für die einzelne Spezies charakteristische Größe, die wir als gegeben hinnehmen müssen, und die bei sehr verschiedenen Temperaturen liegen kann, z. B. für Mais und Hirse zwischen 4,8 und 10,5°, für den Kürbis zwischen 10,5 und 15,6° und für Zuckermelone und Gurke gar zwischen 15,6 und 18,5°, während die Getreidearten, sowie Erbse, Luzerne, Raps und Rotklee zwischen 0 und 4,8° keimen.

Außer diesem Besitz eines charakteristischen Minimums ist die Kurve der Abhängigkeit des Baustoffwechsels von der Temperatur durch ein Optimum ausgezeichnet, das der Kurve des Betriebsstoffwechsels gleichfalls fehlt. Das Optimum ist charakterisiert durch die maximale Entwickelungsgeschwindigkeit. Wird die optimale Temperatur über- oder unterschritten, so erfolgt zwar innerhalb eines meist ziemlich weiten Temperaturintervalls auch noch normale Entwickelung, aber sie geht mit geringerer Geschwindigkeit vor sich, wie bei der optimalen Temperatur und wir dürfen wohl generell annehmen, daß sie auch weniger ökonomisch vor sich geht, daß also das Verhältnis von Anbau zu Umsatz (s. oben) innerhalb dieser optimalen Temperatur sein Minimum

erreicht. Das Temperaturoptimum der Entwickelung liegt weiter von der Lebensgrenze ab, als die Temperatur, bei der der Betriebsstoffwechsel seinen höchsten Wert erreicht. So beträgt z. B. das

	Maximum	Optimum
für die Getreidearten	25 bis 31°	31 bis 37°
für Mais, Kürbis, Hirse	37 bis 44°	40 bis 50°,

während die Lebensgrenze beim Mais erst bei 52,2° erreicht wird und die Getreidegräser bei 37 bis 40° nahe ihrer Lebensgrenze auf das intensivste atmen.

Nicht alle Einzelprozesse erfahren mit steigender Temperatur eine Beschleunigung, es gibt Vorgänge im Stoffwechsel, deren Umfang durch Temperatursteigerung eingeschränkt wird. Beim Flußkrebs z. B. finden sich unter den Stoffwechselprodukten bei niederer Temperatur in nennenswerter Menge unvollständige Oxydationsprodukte, deren Menge durch ihre Eigenschaft Permanganatlösungen (Chamaeleonlösung) zu entfärben, gemessen werden kann. Die Menge dieser Produkte nimmt nun mit steigender Temperatur rasch ab und bei 14° oder höheren Temperaturen sind sie überhaupt nicht mehr nachweisbar.

5b) Lichtwirkungen. Das Licht kann im Stoffwechsel der Organismen zwei ganz verschiedene Arten von Wirkungen entfalten.

Es kann in erster Linie umkehrbare Wirkungen ausüben, deren Kennzeichen darin besteht, daß sie im Dunkeln nie in dem Sinne wie im Licht vor sich gehen, vielmehr in umgekehrter Richtung. Hierher gehört die Wirkung bei der Zuckersynthese aus Kohlensäure und Wasser in der grünen Pflanze, auf der die Möglichkeit des Lebens auf der Erde in der gegenwärtig gegebenen Form beruht.

Die zweite Gruppe der Lichtwirkungen sind die photochemischen Reaktionsbeschleunigungen. Bei ihnen handelt es sich um Prozesse, die auch im Dunkeln vor sich gehen und durch das Licht nur in ihrem Ablauf beschleunigt werden. Nur von dieser letzteren Gruppe von Lichtwirkungen auf den Stoffwechsel soll hier die Rede sein.

Unsere Kenntnisse von solchen Vorgängen sind sehr mangelhaft, so daß nur einige Beispiele angeführt werden können. So wird z. B. das rote Lipochrom des Kieselschwammes Suberites domuncula im Licht entfärbt und zwar durch eine Oxydation. Ob und in welcher Form dieser Prozeß bei der Steigerung des Sauerstoffverbrauchs in Betracht kommt, die bei dem Schwamm im Licht gegenüber dem Dunkeln nachzuweisen ist, ist unbekannt. Auf den Gehalt mancher Tiere an Fermenten wirkt das Licht ein, und zwar nimmt der Gehalt an Katalase (bei den Raupen von Porthesia chrysorrhoea) ab, der an Peroxydase zu. In den Fettstoffwechsel einiger Krebse (Leander) greift das Licht gleichfalls beschleunigend ein.

Bei den vielen Wirkungen, die das Licht auf höhere Organismen ausübt, läßt sich nicht entscheiden, inwieweit es sich dabei um eine direkte Lichtwirkung auf die Prozesse des Stoffwechsels handelt und inwieweit die Lichtwirkungen sekundär, auf dem Wege über die Augen (reflektorisch) sind.

5c) Die Wirkung der Konzentrationsänderung der Nährstoffe. Als allgemeinen Satz können wir an die Spitze dieser Ausführungen über die Wirkung von Konzentrationsänderungen der Nährstoffe die Tatsache setzen, daß es für jeden Nährstoff eine minimale Konzentration gibt, in der er vorhanden sein muß, um überhaupt Wirkungen ausüben zu können, und eine maximale, oberhalb deren er überhaupt keine Wirkung als Nährstoff mehr entfaltet. Wie hoch die maximale und minimale Konzentration liegt, hängt von den spezifischen Eigenschaften der Organismen und den chemischen Eigenschaften der Nährstoffe ab, und es läßt sich hierüber nichts Allgemeines sagen. Einige Beispiele mögen die Extreme zeigen.

Ein Schimmelpilz (Aspergillus repens) gedeiht in 80% Zuckerlösung gut, besser sogar als in 20%, während die meisten Pilze bei 51 bis 55% Zucker nicht mehr wachsen. Auch bei Bakterien kommen so extreme Eigenschaften vor, z. B. wächst Bacterium vernicosum in 70% Rohrzucker oder 50% Milchzucker. Das andere Extrem stellen die Wasserbakterien dar, die in destilliertem Wasser gut gedeihen und etwa alle 8 bis 9 Stunden eine Teilung durchmachen. In 10 ccm destilliertem Wasser können im ganzen etwa 20 Millionen solcher Keime gezogen werden, die allerdings nur $^1/_{100}$ mg organische Substanz enthalten. Von allgemeinstem Interesse ist die Frage, ob in der Intensität des Umsatzes eine zahlenmäßige Beziehung zur Konzentration der gebotenen Nährstoffe besteht. Erst für wenige Stoffe ist dies näher untersucht.

Bei gleicher Lichtintensität stieg bei den Blättern verschiedener Pflanzen (Rubus, Carpinus, Tropaeolum) die Assimilation der Kohlensäure mit steigendem Kohlensäuregehalt der Luft und zwar in der Weise, daß die Beschleunigung der Wurzel aus dem Partiardruck der Kohlensäure proportional war, so daß bei einer Steigerung ihrer Konzentration von 0,03% auf 0,11%, also im Verhältnis von 1 : 3,67, die Assimilation von 1,00 auf 1,85 steigt, was sehr genau der Wurzel aus 3,67 ($\sqrt{3{,}67} = 1{,}87$) entspricht.

Für die Geschwindigkeit des Sauerstoffverbrauchs ist in einer ganzen Reihe von Fällen dieselbe Beziehung zur Wurzel aus dem Partiardruck gefunden worden, doch hat sie nur innerhalb bestimmter und häufig ziemlich enger Grenzen Gültigkeit.

Daß andererseits die Geschwindigkeit bestimmter Stoffwechselvorgänge rascher wachsen kann, als die Konzentration der Nährstoffe, zeigen Erfahrungen an Bakterien (Proteus). Z. B. betrug die relative Menge des Stickstoffs, der bei verschiedenen Konzentrationen in den Bakterienleibern festgelegt wurde:

bei Konzentration	1	Stickstoffernte	1,00
„	2	„	2,25
„	4	„	4,87
„	8	„	17,00
„	16	„	41,70

Während die Konzentration der Stickstoffnahrung um das 16 fache zunahm, stieg die Ernte fast auf das 42 fache.

5d) Der Hunger. Wird einem Organismus kein Stoffwechselmaterial, keine Nahrung von außen zugeführt, so setzt er die Stoffe seines eigenen Körpers im Stoffwechsel um und befindet sich in dem Zustande, den man, unter Generalisierung eines ganz speziellen Zustandes im Säugetierkörper, als Hunger bezeichnet. Die Physiologie des Hungerstoffwechsels scheint prinzipiell der einfachste Fall des Stoffwechsels zu sein. Wir haben eine bestimmte, im Verlauf des Umsatzes abnehmende Stoffmenge im Versuch, die nur aus Stoffen besteht, die für den betreffenden Organismus biochemisch angreifbar sind, hat er sie doch selber aufgebaut, und wenn Prozesse des Umbaues vor sich gehen, so haben wir, da ja wieder nur Körperstoffe Verwendung finden, die günstigsten Bedingungen für eine hohe Ausnutzung der „Nährstoffe" beim Umbau in Körperstoffe. Tatsächlich ist das Bild des Hungerstoffwechsels nicht stets so einfach.

Den einfachsten Fall zeigen nach den bisherigen Erfahrungen einige Fische, bei denen die Abnahme der Intensität des Umsatzes im Hunger genau nach dem Gesetz erfolgt, das man theoretisch erwarten muß, nämlich nach einer logarithmischen Kurve.

Wenn und solange wie der Hunger keine Aenderung in der Qualität der Stoffwechselprozesse zur Folge hat, ist zu erwarten, daß der prozentuale Umsatz pro Zeiteinheit konstant bleiben würde, d. h. daß pro Tag ein gewisser Teil des Bestandes umgesetzt wird, daß also die Werte der Logarithmen der Umsatzgrößen auf einer Geraden liegen müßten. So beträgt z. B. beim Monté-Aal der tägliche Umsatz 5% des Bestandes, d. h. der Umsatz müßte nach 14 Tagen auf die Hälfte, nach 28 Tagen auf ein Viertel gesunken sein. Wie nahe in diesem Fall Beobachtung und Theorie übereinstimmen, zeigt Figur 7. Erst wenn die Tiere auf ein Viertel des Anfangsgewichtes abgehungert sind, tritt, kurz vor dem Tode, eine sogenannte „prämortale" Steigerung des Umsatzes ein, die auch von verhungernden Säugetieren bekannt ist.

Der Hunger kann von jedem Organismus nur für eine gewisse Zeit ertragen werden, schließlich müssen die Stoffdepots des Körpers erschöpft, die lebendige Substanz in ihrem Bestande angegriffen und damit das Leben vernichtet werden.

Der Hungertod ist aber durchaus nicht immer ein Tod durch Erschöpfung des Stoffbestandes, vielmehr treten bei allen Organismen früher oder später Schädigungen als Folgen der Nahrungsentziehung ein, die den Tod unter dem Bilde einer Vergiftung bewirken. Am spätesten kommt es zu solchen Schädigungen bei Tieren, bei denen die Größe während des Hungerns erheblich abnimmt, so daß schließlich ganz winzige Dimensionen erreicht werden. Das Extrem in dieser Hinsicht dürften die Planarien (Plattwürmer) darstellen, deren Verkleinerung im Hunger Figur 8 zeigt. Demgegenüber erleiden die Wirbeltiere im Hunger wohl erhebliche Gewichtsverluste, aber die groben Dimensionen der Tiere, die durch Hartgebilde festgelegt sind, bleiben konstant. Hier tritt die Vergiftung als Folge des Hungers, besonders bei den Säugetieren, deutlich hervor. Ein Hund von 19,65 kg hungerte 27 Tage lang, wobei er auf 14,44 kg abnahm, und befand sich dann im Zustande schweren Kräfteverfalls, der mit Sicherheit in einem oder einigen Tagen zum Tode geführt hätte. Nun erhielt er einige Tage lang ein kaum zureichendes Erhaltungsfutter, das absolut ungeeignet war, um seinen Stoffbestand zu erhöhen, und trotzdem war er darauf imstande, eine zweite Hungerperiode von 61 Tagen auszuhalten. Es konnte also die Schädigung, die das Tier an die Grenze des „Hunger"-Todes geführt hatte, nicht in einem Verbrauch aller disponiblen Stoffe bestanden haben, denn in der zweiten Hungerperiode wurde der Stoffbestand von 14,44 auf 9,17 kg verringert, und bei diesem trat noch nicht der Tod ein, vielmehr konnte sich das Tier durch entsprechende Fütterung noch erholen, und blieb in gutem Zustande am Leben. Auch bei so einfach gebauten Organismen, wie den Schimmelpilzen, scheint eine analoge Schädigung durch das Hungern vorzukommen.

5e) Das Leben ohne Sauerstoff. Zu den festesten Dogmen der Physiologie gehörte die Anschauung, daß Leben ohne Sauerstoff unmöglich sei, und ob schon

ein halbes Jahrhundert vergangen ist, seit Pasteur durch die Entdeckung anaerober Bakterien die Allgemeingültigkeit dieser Anschauung widerlegte, hat doch die Vorstellung von der hohen prinzipiellen Bedeutung, die vielen Prozessen zukommt, bei denen kein Sauerstoff verbraucht wird, erst langsam Eingang in die Wissenschaft gefunden.

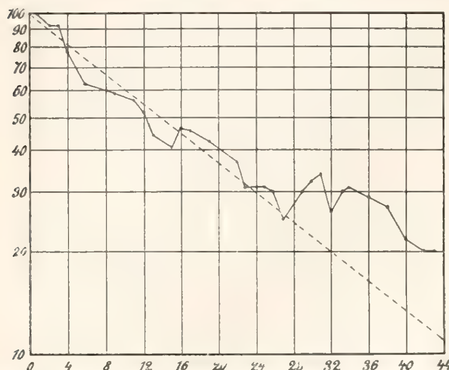


Fig. 7. Abnahme des Sauerstoffverbrauchs des Monté-Aals im Hunger. Punktierte Linie: theoretischer Verlauf bei prozentual konstantem Umsatze: ausgezogene Linie: wirklich beobachteter Sauerstoffverbrauch. Die Ordinaten haben logarithmische Teilung, so daß Exponentialkurven zu geraden Linien werden.



Fig. 8. Verkleinerung von Planaria gonocephala im Hunger. a Umriß eines normalen Tieres, b Hungertier, c dasselbe 13fach vergrößert. Nach Stoppenbrink.

Wie fast überall, wenn es sich um extreme Fähigkeiten von Organismen handelt, geben uns die Bakterien die besten Beispiele. Die weitestgehende Unabhängigkeit ist ja zweifellos dort erreicht, wo schon die Gegenwart geringer Sauerstoffmengen einen Organismus tötet, wie wir es für eine Reihe von Bakterien, den obligat anaeroben Formen (Clostridium foetidum, Bacillus tetani, oedematis maligni usw.) kennen. Generation auf Generation erwächst in sauerstofffreiem Medium, und, ohne Hilfe von Oxydationen durch freien Sauerstoff wird die Betriebsenergie gewonnen, werden aus den Nährstoffen die Körperstoffe, wird die spezifische Struktur des Plasmas aufgebaut. Nächst den obligaten haben die fakultativen Anaeroben ebenfalls die Fähigkeit, generationenlang, anscheinend dauernd, ohne Sauerstoff zu leben, aber die Gegenwart dieses Gases tötet sie nicht. Außerhalb des Kreises der Bakterien sind obligate Anaerobier nicht bekannt, wohl aber fakultative, wie besonders die Gärungserreger, Hefen und Pilze. Unter den Tieren sind einige Protozoen äußerst widerstandsfähig gegen Sauerstoffentziehung und ebenso eine Reihe von Fadenwürmern (Nematoden). So kann das Essigälchen (Anguillula aceti) wochenlang unter Luftabschluß leben und der Spulwurm (Ascaris) hält gleichfalls lange Zeit ohne Sauerstoff aus, wobei er durch Gärung (Valeriansäuregärung s. o.) seine Betriebsenergie gewinnt.

Für die große Mehrzahl der Tiere und Pflanzen freilich stellt die Entziehung des Sauerstoffs eine Schädigung dar, die nur eine gewisse Zeit hindurch ertragen wird. Der allgemeine Mechanismus dieser Schädigung ist durch eine Anhäufung der Produkte des Spaltungsstoffwechsels gegeben, die entweder in den Leibern der Organismen selbst, oder in dem sie umgebenden Medium stattfindet. So häuft sich in Pflanzenteilen, die anaerob leben, Alkohol an, dessen Menge in Blättern und Blüten im Höchstfalle etwa 0,5%, bei Erbsenkeimlingen aber 5% erreichen kann.

Bei Tieren ist eine solche Anhäufung von Spaltungsprodukten entweder direkt nachgewiesen, wie beim Regenwurm, bei dem sich Valeriansäure anhäuft, oder die Ansammlung ist indirekt daraus zu erschließen, daß in der Erholung, bei erneuter Sauerstoffzufuhr, zunächst mehr Sauerstoff verbraucht wird, als vor der Erstickung, wodurch die nicht oxydierten Spaltungsprodukte nachträglich verbrannt werden. Für Blutegel und Weinbergschnecke sind diese Verhältnisse näher untersucht. So verbraucht z. B. ein Blutegel pro Kilogramm Trockensubstanz und Stunde

bei 22° von der Sauerstoffentziehung		170 mg
in der Erholung Tag	1 und 2	307 „
„ „ „ „	3 und 4	371 „
„ „ „ „	5 und 6	164 „

Je nach der Intensität der Schädigung, die die Anhäufung der Produkte des anaeroben Lebens für den Gesamtumsatz bedeutet, wird diese Art des Lebens längere oder kürzere Zeit durchgeführt werden können.

Als Faktoren, welche die Schädigung bestimmen, kommen die chemische Natur der verarbeiteten Nahrung, die Ausscheidungsfähigkeit und die spezifische Empfindlichkeit gegenüber der Anhäufung der eigenen Stoffwechselprodukte in Betracht.

Organismen, welche reichlich Kohlehydrate enthalten, können im allgemeinen einen viel intensiveren Stoffwechsel ohne Sauerstoff aufrecht erhalten, als eiweiß- und fettreiche. So sind die Spulwürmer und Bandwürmer, die typischsten Anaerobier unter den Tieren sehr reich an Glykogen, das beim Spulwurm 20 bis 34%, beim Bandwurm sogar 15 bis 47% der gesamten Trockensubstanz ausmacht. Die Kohlehydrate sind ja in hohem Maße zum Spaltungsabbau geeignet, der in Form der Alkohol-, Buttersäure-, Milchsäure-, Methangärung usw. erfolgt. Demgegenüber stellen die Fette das schlechteste Material für anaerobes Leben dar und auch die Spaltungsprodukte des Eiweiß sind für die meisten Organismen recht giftig.

Welchen Einfluß die chemische Beschaffenheit der umgesetzten Stoffe auf die Möglichkeit anaeroben Lebens hat, zeigen sehr lehrreich einige Erfahrungen über das Verhalten von Pilzen, die auf verschiedenen Nährböden wachsen. So vermögen die Schimmelpilze Aspergillus und Penicillium bei Gegenwart von Sauerstoff etwa gleich gut auf Zucker, Zucker + Pepton und Chinasäure + Pepton zu gedeihen, sobald ihnen aber der Sauerstoff entzogen wird, macht sich ein bedeutender Unterschied geltend, denn während bei einer 1stündigen Sauerstoffentziehung auf Zucker und Zucker/Pepton die Kohlensäureproduktion nur etwa auf $^1/_4$ sinkt und bei erneuter Luftzufuhr schon in der zweiten Stunde der Erholung wieder annähernd den normalen Wert erreicht hat, hört bei den Kulturen auf Chinasäure/Pepton die Kohlensäureproduktion sofort fast völlig auf und bei neuerlicher Luftzufuhr ist nach 3 Stunden noch kaum eine Erholung zu erkennen.

Das Verhalten der Kohlensäureproduktion nach Sauerstoffentziehung ist das wichtigste Moment zur Beurteilung der Vorgänge der Anaerobiose.

Wird einem Gärungserreger (Hefe, Bacillus subtilis usw.) der Sauerstoff entzogen, so steigt seine Kohlensäureproduktion an und bleibt dauernd auf einem höheren Niveau, solange die genügenden Mengen von spaltbaren Nährstoffen vorhanden sind. Bildet man den Quotienten aus der Kohlensäureabgabe im anaeroben Leben durch denjenigen im normalen Leben, so ist er für die Anaeroben stets größer als 1. Man schreibt diesen Quotienten in der Botanik $\frac{J}{N}$, da der anaerobe Stoffwechsel noch vielfach mit dem unglücklichen Wort „intramolekulare Atmung" bezeichnet wird.

Der Quotient ist bei den höheren Pflanzen zum Teil größer als 1 (Samenlappen von Vicia faba und Pisum sativum), teils gleich 1 (Keimpflanzen von Vicia faba und Ricinus), teils kleiner als 1. Bei den Gärungserregern ist er dagegen, wie erwähnt, stets größer als 1.

Bei den Tieren tritt eine Beziehung deutlich hervor, die für die ganze Auffassung des Lebens ohne Sauerstoff wichtig ist: Bestimmt man den Quotienten $\frac{J}{N}$ für kurze Zeiten, so ist er überall größer als 1, wählt man dagegen die Versuchszeit länger, so erhält man häufig Werte, die weit unter der Einheit liegen. Z. B. ist beim Blutegel der Quotient für die ersten fünf Stunden der Erstickung 2,86, für die folgenden fünf Stunden 1,46 und für die nächsten fünf Stunden 0,98. Auch bei den Wirbeltieren ist diese anfängliche Steigerung der Kohlensäureproduktion zu konstatieren, z. B. beim Frosch, wo der Wert $\frac{J}{N}$ zwischen 1,27 und 1,44 liegt. Selbst bei winterschlafenden Säugetieren tritt die Steigerung deutlich hervor, z. B. ist für die Fledermaus der Wert $\frac{J}{N}$ bei kurz dauernder Sauerstoffentziehung größer als 3. Der Annahme, daß primär die Entziehung des Sauerstoffs stets eine Steigerung der Kohlensäureproduktion zur Folge hat, und daß erst sekundär bei längerer Dauer der Erstickung das Absinken eintritt, scheint die Tatsache zu widerstreiten, daß der Schimmelpilz Penicillium glaucum schon innerhalb einer Stunde eine starke Herabsetzung der Kohlensäureproduktion zeigt, so daß $\frac{J}{N} = 0{,}257$ beträgt, aber es ist zu bedenken, daß der Umsatz in diesem Falle ca. 106mal intensiver ist als beim Blutegel, bei dem innerhalb der ersten 10 Stunden die Steigerung der Kohlensäureproduktion deutlich hervortrat, so daß wir sie bei dem Pilz nur innerhalb der ersten 5,7 Minuten erwarten könnten, wenn die

Schädigung durch Sauerstoffentziehung der Intensität des Stoffwechsels proportional ist. Daß dies der Fall ist, zeigen die Erstickungszeiten bei verschiedener Temperatur. Stets ist das anaerobe Leben bei höherer Temperatur abgekürzt und zwar in der Weise, daß wir einen Faktor Q_{10} angeben können (s. oben), der genau die Werte zeigt, welche wir oben für die Beschleunigung des Stoffwechsels erhielten. So beträgt Q_{10} für den Regenwurm (Lumbricus terrestris) 2,9.

Literatur. ***W. Pfeffer,*** *Pflanzenphysiologie, 2. Aufl., Bd. I, 1897, Bd. II, 1904. Leipzig.* — ***F. Czapek,*** *Biochemie der Pflanze. 2 Bände. Jena 1905.* — ***A. Nathanson,*** *Der Stoffwechsel der Pflanzen. Leipzig 1910.* — ***Lafar,*** *Handbuch der technischen Mykologie. 5 Bände Jena. Seit 1904.* — ***Flügge,*** *Mikroorganismen. 2. Aufl., 1886.* — ***Walter Kruse,*** *Allgemeine Mikrobiologie. Leipzig 1910.* — ***O. v. Fürth,*** *Vergleichende chemische Physiologie der niederen Tiere. Jena 1903.* — ***A. Pütter,*** *Vergleichende Physiologie. Jena. 1911.*

August Pütter.

Stoffwechsel.

Spezielle Physiologie des tierischen Stoffwechsels.

1. Einleitung. 2. Methodik der Stoffwechseluntersuchungen. 3. Verwertung der Ergebnisse der Stoffwechselversuche. 4. Der Stoffwechsel im Hungerzustande: a) Der Allgemeinzustand während des Hungers. b) Abnahme des Körpergewichts und des Gewichtes der einzelnen Organe. c) Der Stoffumsatz im Hungerzustande. d) Aenderungen in der Zusammensetzung der Organe und der Ausscheidungen während des Hungers. 5. Der Stoffwechsel im Winterschlaf. 6. Der Grundumsatz oder der Erhaltungsumsatz im Wach- und Schlafzustande. 7. Der Stoffwechsel bei Zufuhr von Nahrung: a) Der Stoffwechsel bei Zufuhr von Eiweiß. b) Der Stoffwechsel bei Zufuhr von Fett und Kohlehydraten. c) Der Stoffwechsel bei Zufuhr von Leim, Abbauprodukten des Eiweißes, Aminosäuren und anderen stickstoffhaltigen Körpern. 8. Der Einfluß des Wassers und der Salze auf den Stoffwechsel. 9. Der Einfluß des Alkohols auf den Stoffwechsel. 10. Der Stoffwechsel bei überschüssiger Nahrungszufuhr (Mast): a) Der Ansatz von Eiweiß (Fleischmast). b) Der Ansatz von Fett (Fettmast) und der Ursprung des Fettes im Tierkörper. c) Der Ansatz von Kohlehydraten (Glykogenmast). 11. Der Stoffwechsel bei der Muskelarbeit. 12. Die Abhängigkeit des Stoffwechsels von der Umgebungstemperatur und dem Luftdruck. 13. Die Beziehung der Körpergröße zum Stoffwechsel. 14. Der Einluß des Alters und des Geschlechtes auf die Größe des Stoffwechsels. 15. Die Ernährung des Menschen.

1. Einleitung. Wie in den Artikeln „Leben" und „Lebensbedingungen" dieses Handwörterbuches Bd. VII S. 65 und S. 88 näher auseinandergesetzt ist, bezeichnet man die Gesamtheit aller Prozesse, die in einem lebendigen Organismus und seinen einzelnen Teilen sich abspielen, als Leben. In diesem lebendigen Organismus findet nun wie in jedem lebendigen System überhaupt auch im Ruhezustande eine fortwährende Zufuhr, eine fortwährende Zersetzung und Umsetzung komplizierter Verbindungen statt, welche dem System die zur Ausübung seiner Funktionen notwendigen Energiemengen liefert. Außerdem geht ein fortwährender Zerfall von Zellen und Geweben vor sich und ihre Erneuerung und Weiterentwickelung durch jugendliche Formen, die in ihrer Gesamtheit den Begriff des Wachstums charakterisieren. Wenn ein lebendiges System in Ruhe ist, so bleibt dasselbe im wesentlichen in seiner Form, in seiner chemischen Zusammensetzung usw. unverändert, aber es findet trotzdem ein fortwährender Stoff- und Energiestrom statt. Es werden dauernd Stoffe zugeführt und abgeführt, es werden komplizierte Verbindungen in einfache zerlegt, es werden Energieformen in andere umgewandelt. Man bezeichnet nun diese dauernd sich vollziehenden Veränderungen als Stoffwechsel des lebendigen Systems und unterscheidet den Ruhestoffwechsel von dem Betriebsstoffwechsel, je nachdem das lebendige System in Ruhe, d. h. stationär ist, oder äußere Reize auf dasselbe einwirken.

Das charakteristische des Ruhestoffwechsels ist nun, daß das System im Stoffwechselgleichgewicht ist, d. h. daß in der Zeiteinheit ebensoviel Stoffe zugeführt und zersetzt, wie umgesetzt und ausgeschieden werden. Man nennt nun diese Stoffe, die dem Organismus von außen zugeführt werden, um das Gleichgewicht zu erhalten, Nahrungsstoffe. Dieselben sind: 1. organische, welche imstande sind bei der Verbrennung im Organismus chemische Energie zu liefern. Ihre Hauptvertreter sind Eiweißstoffe, Fette und Kohlehydrate. 2. Anorganische, Wasser und Salze, welche fortwährend vom Organismus abgegeben werden und deren Ersatz für den normalen Verlauf der Lebensprozesse notwendig ist. 3. Sauerstoff, welcher bei der Oxydation der organischen Nahrungsstoffe gebraucht wird. Die in der Natur vorkommenden natürlichen Gemische dieser Nahrungsstoffe bezeichnet man als Nahrungsmittel (vgl. den Artikel „Nahrungs- und Genußmittel des Menschen" Bd. VII. S. 1). Eine vergleichende Betrachtung des Stoffwechsels der verschiedenen lebendigen Organismen ergiebt nun eine Reihe von allgemein gültigen Uebereinstimmungen und Gesetzen, die im vorausgehenden Artikel („Stoffwechsel. Allgemeine

Physiologie des Stoffwechsels") näher untersucht sind.

In diesem Artikel wollen wir uns mit dem speziellen Stoffwechsel der Säugetiere und der Menschen beschäftigen.

2. Methodik der Stoffwechseluntersuchungen. Um einerseits die Größe des Stoffwechsels zu bemessen und andererseits die Abhängigkeit desselben von den verschiedensten Bedingungen festzustellen, z. B. die Ausnutzung der menschlichen Nahrungsmittel oder die ökonomische und doch ausreichende Ernährung großer Massen, Soldaten, Gefangene usw., ist es notwendig eine genaue Stoffwechselbilanz aufzustellen, d. h. die gesamten Einnahmen und Ausgaben des Organismus zu bestimmen und miteinander zu vergleichen. Die Einnahmen bestehen aus der aufgenommenen Nahrung und dem eingeatmeten Sauerstoff. Die Ausgaben sind in den Ausscheidungen des Körpers, dem Harn, Kot, Schweiß und der ausgeatmeten Luft enthalten. Geringere Ausgaben finden auch durch den Hauttalg, durch Epidermisverluste, Milch, Menstruationsblut, Samen usw. statt; aber bei Stoffwechseluntersuchungen kommen gewöhnlich nur die im Harn, Kot und Expirationsluft, in einzelnen Fällen (Muskelarbeit) auch die im Schweiße ausgeschiedenen Stoffwechselprodukte in Betracht, da die anderen im allgemeinen zu gering sind, um einen merklichen Fehler in der Bilanzrechnung zu machen. Nun hat die Untersuchung der Nahrungsmittel ergeben, daß dieselben Gemische der drei großen Hauptgruppen organischer Nährstoffe, der Eiweißstoffe, der Fette und Kohlehydrate einerseits und des Wassers und der Salze andererseits sind. Durch die chemische Untersuchung der Nahrungsmittel kann also die elementare Zusammensetzung der Einnahmen und ihr Gehalt an den Elementen N, O, H, C, S festgestellt werden. Sowohl in den Einnahmen wie in den Ausgaben wird Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff durch die organische Elementaranalyse, der Stickstoff nach Kjeldahl, Schwefel, Phosphor und die übrigen Elemente nach den gebräuchlichen analytischen Methoden bestimmt; der eingeatmete Sauerstoff und die ausgeatmete Kohlensäure werden durch besondere Apparate analysiert, auf die weiter unten näher eingegangen werden wird. Aus der Stickstoffbilanz können wir die Menge des zersetzten Eiweiß bestimmen, da eine große Reihe von Untersuchungen ergeben haben, daß kein Stickstoff als Gas und auch nur kaum wägbare Spuren als Ammoniak den Körper verlassen, also aller Stickstoff der im Körper zersetzten Eiweißstoffe im Harn und Kot und in besonderen Fällen auch zum Teil im Schweiß zur Ausscheidung gelangt.

Was die Ausgaben des Körpers betrifft, so ist es natürlich notwendig, zunächst quantitativ den Harn und Kot aufzufangen und nach denselben Methoden zu analysieren wie die Einnahmen. Den Harn in einem bestimmten Zeitraum, gewöhnlich 24 Stunden, aufzufangen ist verhältnismäßig leicht, da man bei Versuchen an Menschen jederzeit willkürlich die Blase entleeren kann, bei Versuchen an Tieren, dieselben in Stoffwechselkäfige setzt, abrichtet, ihren Harn nur zu bestimmten Zeiten zu entleeren oder die Blase durch Katheter und Ausspülung vollständig entleeren kann. Der Kot wird durch Knochen, Kohlefütterung oder durch Verfütterung von Farbstoffen abgegrenzt.

Wenn auch die Bestimmungen der Einnahmen und Ausgaben, die in fester oder flüssiger Form vor sich gehen, mit verhältnismäßig einfachen Hilfsmitteln vorgenommen werden können, um so umfangreicherer und komplizierterer Apparate bedarf es um den eingeatmeten Sauerstoff und die ausgeatmete Kohlensäure zu analysieren und dadurch erst eine genaue Bilanzrechnung zu ermöglichen. Schon im Anfange des 17. Jahrhunderts (1614) hat Santorio, Lektor an der Universität Padua, Untersuchungen über seinen eigenen Stoffwechsel veröffentlicht, indem der das Gewicht der aufgenommenen Speisen und Getränke mit denen des entleerten Harnes und Kotes verglich und sein Körpergewicht längere Zeit hindurch kontrollierte. Aus diesen Wägungen suchte er sich Aufschluß über die Größe der insensiblen Transpiration durch die Lungen und die Haut zu verschaffen.

Weitere Fortschritte brachten erst die Entdeckungen von Lavoisier über die Rolle des Sauerstoffs bei der Oxydation. Er hielt Tiere unter eine Glasglocke bis zum Tode und analysierte dann die Luft oder er brachte ein Meerschweinchen unter eine ventilierbare Glasglocke und bestimmte in der ausströmenden Luft die Kohlensäure und das Wasser. Von Lavoisier rührt auch der erste Versuch am Menschen her, indem er denselben durch eine Gesichtsmaske atmen ließ, die exspirierte Luft maß und analysierte (Fig. 1).

Es sind dann von der Mitte des 19. Jahrhunderts an bis in die Neuzeit eine große Reihe von Apparaten zur Untersuchung des Gaswechsels für Menschen und für Tiere konstruiert worden, deren vielfache Formen auf drei verschiedene Prinzipien zurückgeführt werden können. Wenn es sich darum handelt, länger dauernde Versuche anzustellen, ist es notwendig, den Menschen oder das Versuchstier in einen luftdicht abgeschlossenen Raum zu bringen und dafür Sorge zu tragen, daß die Luft dieses Raumes dauernd ihre normale Zusammen-



Fig. 1. Die Versuchsanordnung Lavoisiers zur Untersuchung des respiratorischen Gaswechsels.

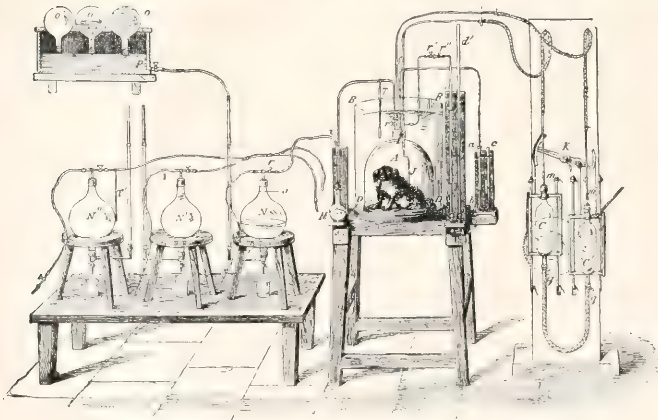


Fig. 2. Respirationsapparat von Regnault und Reiset.

setzung behält. 1. Dies kann dadurch geschehen, daß die gebildete Kohlensäure durch geeignete Absorptionsmittel, z. B. durch Kalilauge absorbiert wird und für den verbrauchten Sauerstoff reiner Sauerstoff oder auch atmosphärische Luft nachströmt. Nach diesem Prinzip ist der Apparat von Regnault und Reiset konstruiert worden (Fig. 2).

Derselbe besteht aus einer Glasglocke A, die zur Vermeidung von Temperaturschwankungen mit einem Wassermantel umgeben ist. Von dieser Glocke führen Glasröhren zu einem Pumpwerk, welches die mit Kalilauge gefüllten Zylinder C und C_1 enthält. Durch abwechselndes Heben und Senken dieser Zylinder wird beim Heben des einen Zylinders Luft aus der Glocke angesaugt und beim Senken füllt der andere Zylinder sich mit Lauge und preßt die von Kohlensäure befreite Luft in den Apparat hinein. Für den verbrauchten Sauerstoff tritt reiner Sauerstoff aus dem Vorratsflaschen N, N_1, N_2 ein. Wenn man dann die Zusammensetzung der

Luft in der Glocke vor und nach dem Versuche feststellt, das Volumen des aufgenommenen Sauerstoffs und der absorbierten Kohlensäure bestimmt, so erhält man auf diese Weise Aufschluß über den Gaswechsel des Versuchstieres. Auf dem Prinzip von Regnault und Reiset beruht der Respirationsapparat von Hoppe-Seyler für Menschen, von Pflüger und Colasanti für kleine Tiere, von Zuntz und Oppenheimer für Hunde und der von Atwater und Benedict, der mit einem Kalorimeter verbunden ist.

Eine zweite Gruppe von Respirationsapparaten ist nach einem von Pettenkofer und Voit angegebenen Prinzip gebaut worden, die den Versuchsraum andauernd durch einen frischen Luftstrom ventilierten, um die Ansammlung von Wasserdampf und gesundheitsschädlichen Gasen zu verhindern, auf die direkte Bestimmung des Sauerstoffs verzichteten und nur die Abgabe von Kohlensäure und Wasserdampf bestimmten. Nach dem Pettenkoferschen Prinzip ist außer dem großen Apparat von Pettenkofer der kleine Respirationsapparat von Voit eingerichtet (Fig. 3).

Das Versuchstier ist in einer luftdicht gebauten Kammer H eingeschlossen. Vermittels einer Gasuhr b wird durch die Kammer eine zu messende Menge Luft von

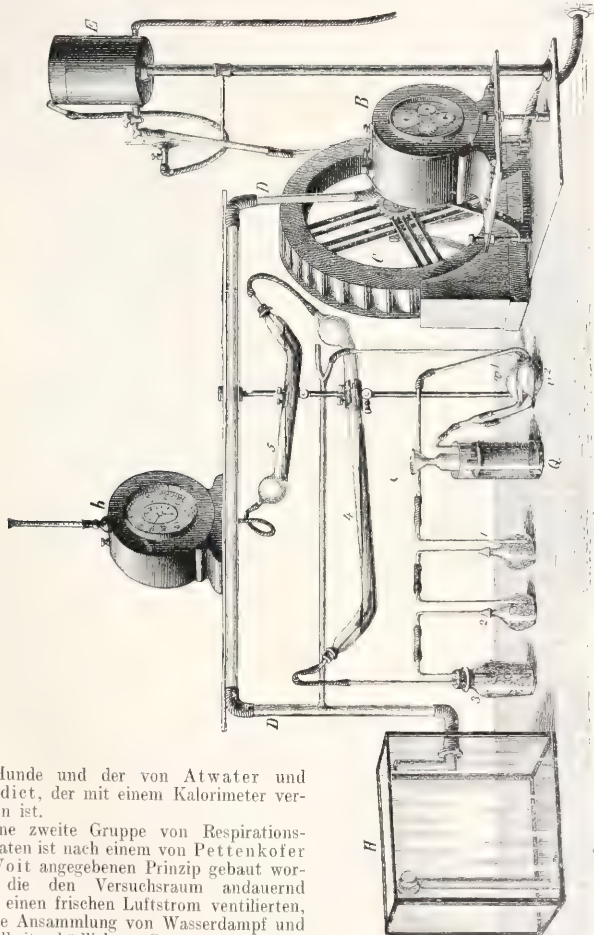


Fig. 3. Kleiner Respirationsapparat von Voit.

bekanntem Kohlensäure- und Wassergehalt hindurchgeleitet. In der aus der Kammer ausströmenden Luft wird die Zunahme an Kohlensäure und Wasser dadurch ermittelt, daß man einen genau abgemessenen Teil der Luft durch eine Reihe von Absorptionsgefäßen gehen läßt, von denen 1 und 2, mit Schwefelsäure gefüllt, zur Absorption des Wassers dienen und 4 und 5, mit Barytwasser gefüllt, die Absorption der Kohlensäure ermöglichen. Da man das Volumen der ventilierten Luft und das Volumen der einzelnen Luftproben genau kennt, kann man aus der Analyse der Luftproben die in einem bestimmten Zeitraum produzierte Kohlensäure- und Wassermenge berechnen. denen die Lungen direkt mit den Meßapparaten in Verbindung treten. Diese Methode ist ja schon von Lavoisier benutzt worden und die Richtigkeit ihrer Anwendung ist durch die Tatsache begründet, daß nur ungefähr 1% der ausgeschiedenen Kohlensäure und ebensoviel des aufgenommenen Sauerstoffs durch die Haut ventiliert, also die Untersuchung des Lungengaswechsels in vielen Fällen vollständig ausreicht. Diese Methode ist besonders von Zuntz und seinen Schülern ausgearbeitet worden und beruht darauf, daß man mit Nase und Mund oder Mund allein, indem man die Nase zuklemmt, durch eine dicht anliegende Maske durch ein Rohr atmet, das mit zwei

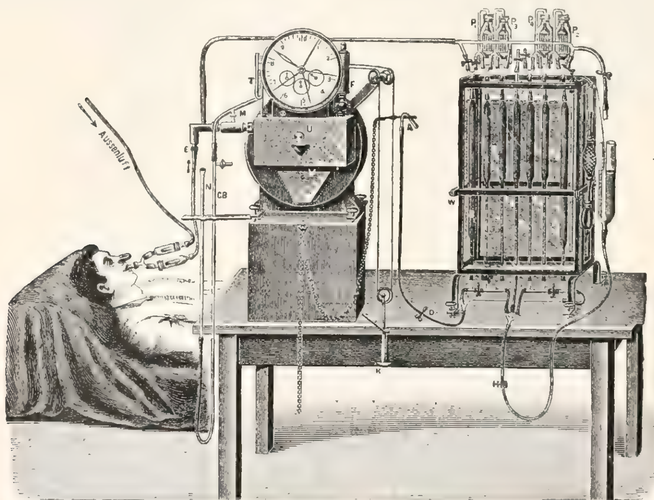


Fig. 4. Respirationsapparat zur Untersuchung der Atmung des ruhenden Menschen. Nach Zuntz.

Auf dem Pettenkoferschen Prinzip beruhen die Apparate von Rubner, Sondén und Tigerstedt, Johannsson, Tigerstedt in Helsingfors (1906), der ältere Apparat von Atwater, Rosa und Benedict (1897) die Apparate von Jaquet und Grafe, das Respirationskalorimeter von Hagemann und der Apparat von Tangl.

Während die bisher beschriebenen Apparate im allgemeinen zu Versuchen von vielstündiger oder tagelanger Dauer benutzt wurden, der Beobachtungsfehler bei kurzdauernden Versuchen aber dann verhältnismäßig groß wird, kommen bei kurzdauernden Versuchen Apparate in Anwendung, bei Ventilen verbunden ist, welche Inspirations- und Exspirationsluft voneinander trennt, Bei Tieren wird durch eine Trachealkanüle die Verbindung mit den Apparaten hergestellt. Auf die Anyalse der Inspirationsluft wird verzichtet unter der Annahme, daß ihre Zusammensetzung, wenn dieselbe aus dem Freien entnommen wird, nicht merklich vom Mittelwert abweicht. Die Exspirationsluft wird durch eine Gasuhr gemessen und durch besondere Einrichtungen eine Durchschnittsprobe zur Analyse der Exspirationsluft gesammelt. Figur 4 zeigt den Apparat für den ruhenden Menschen, Figur 5 für einen in Bewegung befindlichen, bei welchem

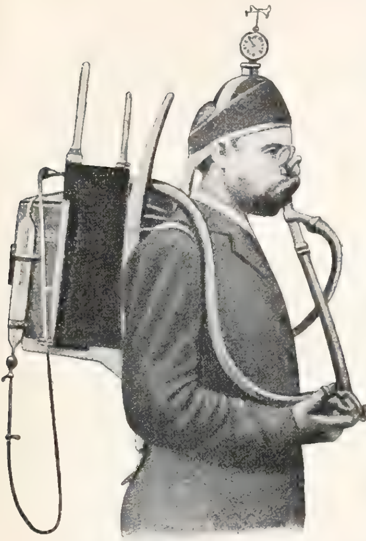


Fig. 5. Respirationsappart für marschierenden Menschen. Nach Zuntz.

der schwere, durch Wasser abgesperrte Gasmesser durch einen trockenen Gasmesser ersetzt wird, in dem durch bewegliche Lederbälge das Volumen der Gase gemessen wird. Derselbe läßt sich in Form eines Tornisters der Versuchsperson anschnallen.

Der neueste Apparat, der große Respirationsapparat von Zuntz in der Berliner landwirtschaftlichen Hochschule (beschrieben in der „Umschau". Herausgegeben von J. H. Bechhold XV. Jahrgang Nr. 5 28. Januar 1911) ist so eingerichtet, daß er von Fall zu Fall gestattet, sowohl die Regnault-Reisetsche wie die Pettenkofersche Methode anzuwenden, und daß er zugleich die Regnault-Reisetsche Methode von dem Nachteil der überfeuchteten und übelriechenden Luft befreit. Um den Einfluß der Muskelarbeit auf den Gaswechsel zu studieren, ist im Innern der Respirationskammer eine Tretbahn eingerichtet. Die Absorption der Kalilauge und die Kondensation des Wasserdampfes erfolgt, wenn der Apparat nach Regnaut-Reiset benutzt wird, in einem besonderen Absorptionsturm, indem dauernd ein Strom von Kalilauge auf Röhren rieselt, die durch eine Kältemaschine auf —15° C gehalten werden.

Bei der Anwendung nach dem Pettenkoferschen Prinzip wird der Kasten durch geeignete, elektrisch betriebene Ventilatoren ventiliert (Fig. 6 und 7).

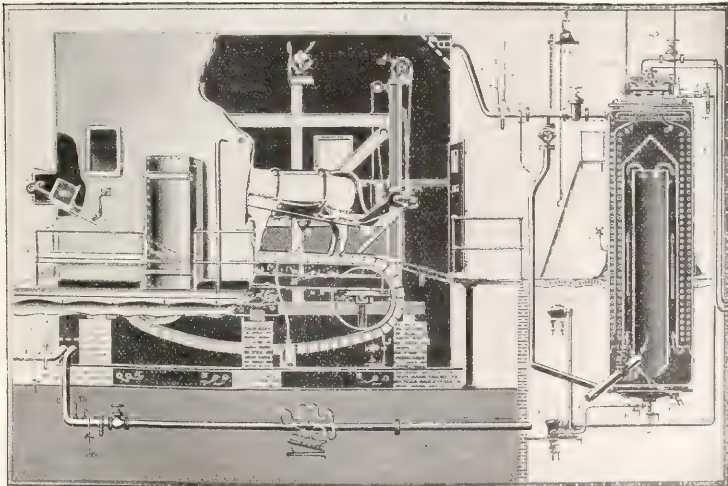


Fig. 6. Blick in die Respirationskammer des Apparates von Zuntz. Rechts der Absorptionsturm.

Ferner hat man in neuerer Zeit Apparate hergestellt, welche es gestatten, außer dem Gaswechsel auch gleichzeitig die von dem Organismus produzierte Wärmemenge zu messen (vgl. den Artikel „Wärmehaushalt"). Zu dieser Gruppe gehören das Respirationskalorimeter von Atwater und Benedikt für Menschen und das von Hagemann für große Haussäugetiere. Eine ausführlichere Beschreibung der bekanntesten Respirationsapparate findet sich in Tigerstedt, Handb. d. physiol. Methodik Bd. I Abt. 3 S. 71 bis 149.

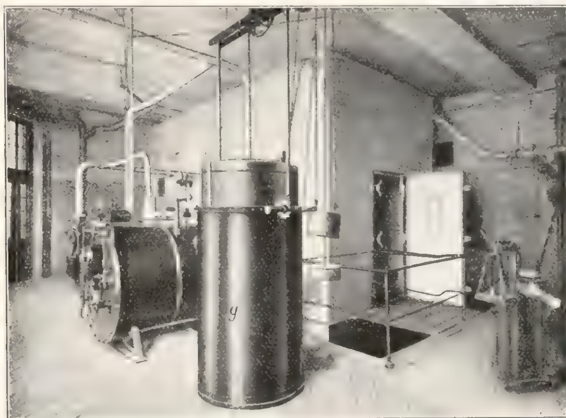


Fig. 7. Die Respirationskammer von außen nebst den Gasuhren und dem Gasometer G.

3. Verwertung der Ergebnisse der Stoffwechselversuche. Wenn man mit den im vorstehenden angegebenen Methoden die gesamten Einnahmen und Ausgaben eines Organismus bestimmt hat, so fragt es sich, wie die Ergebnisse dieser Untersuchung für die Aufstellung einer genauen Stoffwechselbilanz zu verwerten sind. Da die organischen Nahrungsstoffe Eiweiß, Fett und Kohlehydrate kohlenstoffhaltig sind, so ergibt die Bestimmung des Kohlenstoffs einen Aufschluß über den Verbrauch an organischen Nahrungsstoffen. Wird ebensoviel Kohlenstoff ausgeschieden als in der Nahrung aufgenommen, so wird eine der aufgenommenen Nahrung entsprechende Menge organischer Substanz im Körper verbrannt. Wird mehr Kohlenstoff ausgeschieden als aufgenommen, so gibt der Körper von seiner organischen Substanz ab, wird weniger Kohlenstoff ausgeschieden, so setzt er organische Substanz an. Weil die stickstoffhaltigen Bestandteile der Nahrung zum größten Teil Eiweißstoffe sind und der Stickstoff des zersetzten Eiweißes fast vollständig im Harn und Kot und Schweiß zur Ausscheidung gelangt, so ist die Stickstoffausscheidung ein Maß für die Größe der Eiweißzersetzung. Die Eiweißstoffe enthalten im Mittel ungefähr 16% Stickstoff. Durch Multiplikation mit dem Faktor 6,25 ($16 \times 6{,}25 = 100$) kann man die zersetzte Menge Eiweiß berechnen. Bei Stickstoffgleichgewicht, wenn die Menge des ausgeschiedenen Stickstoffs ebensogroß ist, wie die des eingenommenen, wird alles in der Nahrung aufgenommene Eiweiß zersetzt, bei negativer Stickstoffbilanz wird Eiweiß angesetzt, bei positiver verliert der Körper von seinem Eiweißbestand. Nun ist im Eiweiß das Mengenverhältnis von Stickstoff zu Kohlenstoff wie 1:3,2. Durch Multiplikation des Stickstoffs mit 3,2 erhält man also die Menge des auf Eiweiß entfallenden Kohlenstoffs. Durch die Subtraktion des auf Eiweiß entfallenden Kohlenstoffs von dem Gesamtkohlenstoff der Einnahmen und Ausgaben kann man also bestimmen, wieviel stickstofffreie Stoffe, Fette und Kohlehydrate außer Eiweiß im Körper zersetzt sind.

Der eingeatmete Sauerstoff und der Sauerstoff der Nahrungsmittel kommt im Organismus in Form von Kohlensäure, Wasser und den sauerstoffhaltigen Verbindungen der Exkrete zur Ausscheidung. Die Menge des eingeatmeten Sauerstoffs ist deshalb auch ein Maß für die Größe der

Oxydationsprozesse des Körpers. Nun lehrt ein Vergleich der Volumina der ein- und ausgeatmeten Luft, daß das Volumen der ausgeatmeten Luft immer kleiner ist als das der eingeatmeten. Der Sauerstoff wird nämlich nicht allein zur Oxydation des Kohlenstoffs, sondern auch zur Bildung von Wasser und anderen sauerstoffhaltigen Verbindungen der Exkrete benutzt. Man nennt nun das Verhältnis der ausgeatmeten Kohlensäure zum eingeatmeten Sauerstoff $\frac{CO_2}{O_2}$ respiratorischer Quotient.

Der respiratorische Quotient ist also immer im normalen Organismus kleiner wie 1. Aus der Definition des respiratorischen Quotienten ergibt sich nun, daß die Größe des respiratorischen Quotienten uns Aufschluß darüber gibt, wieviel von dem aufgenommenen Sauerstoff zur Oxydation von Kohlenstoff und wieviel zur Oxydation von Wasserstoff oder anderen Stoffen benutzt wird, mit anderen Worten, sie gibt uns Aufschluß über die Art der im Körper zersetzten Nahrungsstoffe. Wird nämlich reiner Kohlenstoff zu CO_2 oxydiert, so ist das Volumen der entstandenen Kohlensäure gleich dem des verbrauchten Sauerstoffes. Der respiratorische Quotient ist gleich 1. Wenn außer Kohlenstoff noch andere Elemente oxydiert werden, so ist natürlich das Volumen der gebildeten Kohlensäure um so kleiner, je mehr von diesen Elementen z. B. H zu H_2O oxydiert werden. Der respiratorische Quotient wird bedeutend kleiner als 1. Werden Kohlehydrate im Körper oxydiert, so nähert sich der respiratorische Quotient der Einheit, weil die Kohlehydrate schon soviel Sauerstoff enthalten, als zur Oxydation des Wasserstoffs notwendig ist. Wird fast nur Eiweiß verbrannt, so erreicht er die Zahl 0,8, bei reiner Fettverbrennung die Zahl 0,7. Man kann also aus der Größe des respiratorischen Quotienten Rückschlüsse machen auf die Art der im Körper zersetzten Stoffe. Es gibt aber auch Ausnahmen, in welchen der respiratorische Quotient entweder größer wird als 1 oder unter den Wert 0,7 heruntersinkt. Der erstere Fall tritt ein, wenn im Körper Fett aus Kohlehydraten gebildet wird, wenn also sauerstoffreiche Verbindungen, Kohlehydrate, in sauerstoffärmere verwandelt werden (Bleibtreu), der zweite Fall, wenn der O_2 im Körper in irgendeiner Form aufgespeichert wird.

Der Wasserstoff wird zu Wasser oxydiert und verläßt mit dem Wasser der Nahrung den Körper durch den Harn, den Kot und durch die Verdunstung durch die Lungen und die Haut. Die Wasserbilanz gibt also auch an, wieviel Wasser außer dem in der Nahrung aufgenommen bei der Verbrennung im Körper entsteht.

Der Schwefel und Phosphor der Nahrung wird hauptsächlich in Form von Schwefelsäure und Phosphorsäure zum größten Teil durch den Harn, zum Teil auch durch den Kot ausgeschieden; da nun S und P fast ausschließlich aus dem zersetzten Eiweiß stammen, so kann eventuell die Bestimmung derselben Rückschlüsse auf die Größe der Eiweißzersetzung gestatten. Die Durchführung einer Stoffwechselbilanz mit sämtlichen Einnahmen und Ausgaben und die Art und Weise der Berechnung und die Verwertung der Resultate möge an einem Stoffwechselversuche demonstriert werden, den Benedict und Milner aufgeführt haben (nach Tigerstedt, Fortschritte der naturwissenschaftlichen Forschung, herausgegeben von E. Abderhalden Bd. V, S. 257).

Der Versuch dauerte drei Tage.

Tabelle siehe Seite 712.

Während der drei Tage des Versuches hat der Körper also 1,76 g Stickstoff und 6,6 g Asche angesetzt und 2,85 g Kohlenstoff verloren. Wenn dann noch die elementare Zusammensetzung des Wassers und der Kohlensäure berücksichtigt wird, so hat der Körper insgesamt 1886,34 g Wasserstoff und 18709,60 g Sauerstoff aufgenommen, sowie 1770,68 g Wasserstoff und 17777,84 g Sauerstoff abgegeben.

Im Körper sind also noch 115,67 g Wasserstoff und 931,75 g Sauerstoff zurückgeblieben.

Die von Benedict und Milner durchgeführte Berechnung der Bilanz ergab nach Tigerstedt folgendes. Es wurden angesetzt.

10,56 g Eiweiß	mit	1,76 g N +	5,57 g C +	0,74 g H +	2,32 g O
17,49 g Glykogen	,,	—	7,70 g C +	1,08 g H +	8,65 g O
1039,67 g Wasser	,,	–	—	116,34 g H +	923,33 g O
	Summa	1,76 g N +	13,33 g C +	118,16 g H +	934,30 g O
Es verlor der Korper:					
21,10 g Fett	mit	— g N +	16,06 g C +	2,49 g H +	2,55 g O
Die Bilanz ist		+1,76 g N —	2,73 g C +	115,67 g H +	931,75 g O

Der Stoffwechsel des Körpers hat also während dieser 3 Tage, mit Abzug für den Verlust im Kot, 292,7 g Eiweiß + 1025,4 g Fett + 1284,5 g Kohlehydrate betragen.

Bei der bisherigen Betrachtungsweise des Stoffwechsels vom rein chemischen Standpunkte aus sind die energetischen Vorgänge des Stoffwechsels vollständig unberück-

	Einnahmen in Gramm									
	Ges. Gew.	Wasser	Eiweiß	Fett	Kohlehydrate	Asche	N	C	H[1])	O[1])
1. Tag. Brot	440	170,7	36,5	6,6	222,2	4,0	6,42	122,67	17,82	118,39
Butter	45	4,0	0,6	38,8	-	1,6	0,09	29,11	4,73	5,47
„Ginger snaps"	60	4,5	3,1	5,4	45,6	1,4	0,55	25,45	3,68	24,42
Weizen	40	3,3	3,9	0,7	31,5	0,6	0,68	16,53	2,26	16,63
Zucker	45	—	—	—	45,0	—	—	18,95	2,92	23,13
Cerealkaffee	1 200	1 189,2	1,2	—	9,6	—	0,12	5,64	0,84	4,20
Milch	1 000	858,0	37,6	44,0	53,0	8,0	6,00	75,80	11,80	40,40
Sahne	1 020	705,8	28,6	238,7	40,8	0,1	4,59	213,79	32,23	57,49
Summa:	3 850	2 935,5	110,9	334,2	447,7	21,7	18,45	507,94	76,28	290,13
Sauerstoff aus der Luft	1 545,24									
2. Tag. Summa:	3 900	2 970,1	112,3	345,9	449,7	20,0	18,68	518,42	77,86	292,94
Sauerstoff aus der Luft	1 652,56									
3. Tag. Summa:	3 960	3 011,7	113,9	359,9	452,1	22,4	18,95	531,00	79,76	296,19
Sauerstoff aus der Luft	1 517,80									
Essen: Summa für 3 Tage	11 710	8 917,3	337,1	1 040,0	1 349,5	66,1	56,08	1 557,36	233,90	879,26
Sauerstoff: „ „ 3 „	4 715,60									
Wasser getrunken „ 3 „	5 850	5 850,0								
Gesamteinnahmen für 3 Tage	22 275,60	14 767,3	337,1	1 040,0	1 349,5	66,1	56,08	1 557,36	233,90	879,21
	Ausgaben pro 3 Tage in Gramm									
Kot	719,1	573,8	33,8	36,7	47,5	27,3	5,39	80,40	12,22	19,99
Harn	3 427,7	3 267,6		—	—	32,2	40,97	38,05	9,60	33,28
Kohlensäure d. d. Lungen u. Haut	5 286,56	—	—	—	—			1 441,76	—	—
Wasser d. d. Lungen u. Haut	11 789,19	11 789,19					1,95[2])			
Summa:	21 222,25	15 630,59				59,5	54,32	1 560,21	21,82	53,27
Bilanz:	+ 1 053,05	—	—	—	—	+ 6,0	+ 1,76	— 2,85	—	—

[1]) In der Trockensubstanz. [2]) Stickstoff durch die Haut.

sichtigt geblieben. Hierüber geben die Artikel „Energetik", „Stoffwechsel. Allgemeine Physiologie des Stoffwechsels" und „Wärmehaushalt" genaueren Aufschluß.

Ich möchte hier nur kurz erwähnen, daß man bei der Betrachtung des Stoffwechsels vom energetischen Standpunkte aus die Energiemengen festgestellt hat, welche bei der Verbrennung der organischen Nahrungsstoffe, Eiweiß, Fette und Kohlehydrate, im Organismus produziert werden. Als mittlere Standardzahlen haben sich nach den Untersuchungen von Rubner nach Abzug der im Harn und Kot noch vorhandenen Wärmewerte folgende Werte ergeben:

1 g Eiweiß = 4,1 Kalorien,
1 g Fett = 9,3 „
1 g Kohlehydrat = 4,1 „

Ferner ist durch die Untersuchungen von Rubner nachgewiesen, daß die einzelnen Nahrungsstoffe sich in Gewichtsmengen vertreten, welche ungefähr gleich großen Kalorienwerten entsprechen (Gesetz der Isodynamie). Hinsichtlich der Wärmebildung sind also gleichwertig resp. isodynam 2,3 Eiweiß = 1 g Fett = 2,3 g Kohlehydrate. Außerdem ist durch die Untersuchungen von Rubner an Tieren und später von Atwater, Rosa, Benedict und Milner am Menschen bewiesen worden, daß die von einem Tiere resp. Menschen produzierte Wärmemenge gleich der Wärmemenge ist, die aus den zersetzten Körper- und Nahrungsstoffen berechnet ist; daß also die Nahrungsstoffe bei ihrer Verbrennung im Körper dieselbe Wärme entwickeln, als wenn sie außerhalb des Körpers verbrennen. Rubner fand als Differenz 0,3% in einem Versuch von 46 Tagen, Atwater, Rosa, Benedict und Milner in 51 Versuchen von 148 Tagen 0,6%, Benedict und Milner in 11 Versuchen mit 24 Tagen, wo auch der Sauerstoff direkt bestimmt wurde, 0,66%. Aus diesen Versuchen geht also hervor, daß das Gesetz von der Erhaltung der Energie auch für den tierischen Organismus gültig ist.

4. Der Stoffwechsel im Hungerzustande.

4a) Der Allgemeinzustand während des Hungers. Beim Hungern, d. h. wenn ein Organismus keine Nahrung erhält, gehen die Zersetzungen noch eine Zeitlang ununterbrochen vor sich, der Organismus lebt von seiner eigenen Körpersubstanz. Was der Allgemeinzustand bei Hungernden, sowohl Menschen wie Tiere betrifft, so haben besonders die Versuche an Hungerkünstlern ergeben, daß der Hunger mit verhältnismäßig geringen Beschwerden verbunden ist, wenn auch in den ersten Tagen das Hungergefühl besonders ausgeprägt ist. Ja sogar am Ende eines solchen Hungerversuches soll die Eßlust anfangs nicht besonders stark sein. Das Bedürfnis nach Wasser ist sowohl bei hungernden Menschen wie bei hungernden Hunden gering. Hungernde Hunde verweigern sogar manchmal bei längerdauernden Versuchen den Wassergenuß. Puls, Respiration und Körpertemperatur zeigen nur geringfügige Aenderungen. Am meisten ins Auge fallend ist die Abmagerung und die immer mehr in Erscheinung tretende Kraftlosigkeit, wenn auch hierin Ausnahmen vorkommen können, wie bei dem Hungerkünstler Succi, der am 10. Tage noch einen einstündigen Ritt ausführte und am 23. Hungertage noch zwei Gänge auf Säbel machte. Auch bei Hunden beobachtet man manchmal eine ziemlich andauernde verhältnismäßig große Leistungsfähigkeit. Ein 38 Tage hungernder Hund ging bis zum Schluß noch jeden Tag eine hohe Treppe hinauf und stellte sich freiwillig auf die Wage. Ein anderer Hund war am 117. Hungertage noch sehr munter. Meistens liegen zwar hungernde Hunde ganz apathisch in ihrem Käfig.

4b) Abnahme des Körpergewichts und des Gewichts der einzelnen Organe. Die auffälligste Erscheinung ist die starke Gewichtszunahme, dieselbe ist in den ersten Tagen am stärksten und nimmt dann ziemlich gleichmäßig ab.

Ueber die Gewichtsverluste hungernder Menschen gibt folgende Tabelle Aufschluß.

Cetti	nach	10	tägigem	Hungern	6,35 kg	= 11,14 %	des Anfangsgewichts
Breithaupt	„	6	„	„	3,62 kg	= 6,03 „	„ „
Succi	„	30	„	„	14,3 kg	= 22,7 „	„ „
„	„	30	„	„	13,1 kg	= 21,7 „	„ „
„	„	30	„	„	11,96 kg	= 19,2 „	„ „
„	„	30	„	„	13,5 kg	= 17,2 „	„ „
Schwede (Johannsson)	„	5	„	„	5,01 kg	= 7,37 „	„ „
Schenk	„	16	„	„	8,1 kg	= 15,0 „	„ „

Die Frage, wie lange ein Mensch das Hungern aushalten kann, läßt sich natürlich nicht mit Sicherheit beantworten. Sicher verbürgt ist der Hungerversuch Succis von 30 Tagen. Weniger gut verbürgt sind die Hungerversuche von Dr. Tanner (40 Tage und Merlatti 50 Tage) und eines Sträflings, der im Jahre 1831 nach 63 Hungertagen in Toulouse starb und während dieser Zeit nur Wasser zu sich nahm. Neuerdings soll in Ungarn ein Bauernbursche infolge religiösen Wahnsinns nach 56 Hungertagen gestorben sein.

Für Tiere verfügen wir über ein größeres und sichereres Beobachtungsmaterial. Chossat gibt an, daß hungernde Tiere (Säugetiere, Vögel, Amphibien, Fische) den Hungertod erleiden, wenn sie ungefähr 40% ihres Körpergewichts verloren haben. Doch beobachtete Chossat große Schwankungen, und auch Voit machte darauf aufmerksam, daß es auf individuelle Verschiedenheiten, Ernährungszustand, Alter der Tiere usw. sehr ankomme. Neuerdings sind nun mehrere Hungerversuche an Hunden bekannt geworden, bei denen die Hungerzeit viel länger dauerte als die bisher beobachtete, längste Periode von 60,3 Tagen an dem alten Hund von Falck; so der Versuch von Kumagawa und Miura (98 Tage, Gewichtsabnahme 65%) Pflüger (2 Versuche I. 73 Tage, Gewichtsabnahme 57%, II. 70 Tage, Gewichtsabnahme 62%, Pflügers Archiv Bd. 119 S. 117). Howe, Matill und Hawk (2 Versuche an demselben Hunde von 117 und 103 Tagen. Journ. of biolog. chemistr. Bd. 11 S. 103 1912. Gewichtsabnahme 63%).

Die Fähigkeit, Hunger zu ertragen, ist bei Kaltblütern bedeutend größer. Der Lachs kann das Hungern 8 bis 9 Monate, die Klapperschlange 27 Monate, die Riesenschlange 23 Monate, Schildkröte 18 Monate, die Viper 20 Monate. Frösche, Salamander 12 Monate ertragen. Wir haben im physiologischen Institute in Bonn Frösche über 2 Jahre lang ohne Nahrung am Leben erhalten. Protozoen (Paramäcien und Colpidien) vertragen das Hungern nach den Untersuchungen von Wallengreen 15 bis 17 Tage.

Was die Gewichtsabnahme der einzelnen Organe im Hunger betrifft, so liegen darüber eine Reihe von Untersuchungen vor, die so angestellt sind, daß zwei Tiere gleichen Wurfes, möglichst gleicher Größe und Schwere zu dem Versuche benutzt wurden. Von dem einen wurden die Anfangsgewichte der Organe genommen und von dem anderen die Gewichte am Ende der Hungerperiode. Die Versuche sind an Tauben, Hunden und Katzen angestellt worden und die Ergebnisse in folgender Tabelle zusammengestellt.

100 g Organ verloren an Gewicht in %.

Organ	Chossat	Voit		Kumagawa	Sedlmair	
	Tauben	Katze		Hund	Katze	
					I	II
	frisch	frisch	trocken	frisch (fettfrei)	trocken	trocken
Knochen	17	14	—	5	19	24
Muskeln	42	31	30	42	70	65
Leber	52	54	57	50	72	64
Nieren	32	26	21	55	58	53
Milz	71	67	63	57	74	75
Pankreas	64	17 (Hoden)	—	62	39	69
Genitalapparat	—	40	—	49	—	—
Lunge	22	18	19	29	30	35
Herz	45	3	—	16		
Magen	40	—	—	} 32	} 53	57
Darm	42	18	—			
Gehirn und Rückenmark	2	3	0	22	+ 1,14	1,6
Haut u. Haare	33	21	—	28	32	44
Fettgewebe	93	97	—	—	97	89
Blut	75 (?)	27	18	48	—	—
Speiseröhre	31		—	—	—	—

Es geht also aus diesen Versuchen hervor, daß, wie auch die später zu besprechenden Stoffwechselversuche ergeben haben, das Fettgewebe am meisten abnimmt, dann folgen die quergestreifte Muskulatur, die drüsigen Organe, Leber, Pankreas, Nieren und die Milz. Das Gewicht der Zentralnervensysteme bleibt anscheinend konstant. Die Ergebnisse bezüglich der Abnahme des Herzgewichts sind noch wiedersprechend. Während nach Voit und Kumagawa das Herz kaum oder nur wenig abnimmt, finden Chossat und Sedlmair eine stärkere Abnahme. Diese Beobachtungen sind wohl nur dahin zu deuten, daß die lebenswichtigeren Organe wie Zentralnervensystem und das Herz, wenn man die Zahlen von Voit und Kumagawa für dasselbe als richtig annimmt, d. h. die Organe, die für die Ausübung der normalen Funktion des Organismus am wichtigsten sind, sich auf Kosten der übrigen Organe während des Hungers ernähren und dadurch ihr Gewicht konstant halten. Für die Richtigkeit dieser Anschau-

ung scheinen mehrere Versuche zu sprechen, die von anderem Gesichtspunkte aus unternommen wurden. So hat E. Voit beobachtet, daß bei Tauben, die mit kalkarmer Nahrung gefüttert wurden, die Knochen, die zur Bewegung derselben benutzt werden, kaum an Gewicht verloren, während die Schädelkapsel und das Brustbein zu „ganz dünnen löcherigen Gebilden“ wurden. Ferner gehören hierhin die Beobachtung von Miescher am Rheinlachs und Pflüger an der Geburtshelferkröte. Der Lachs zieht zum Laichgeschäft in die Flüsse hinauf und nimmt 6 bis 9 Monate lang keine Nahrung zu sich; während dieser Zeit entwickeln sich die Geschlechtsorgane ganz kollossal und zwar auf Kosten der fast vollständig geschwundenen Rumpfmuskulatur. Bei der Geburtshelferkröte (Alytes obstetricans) ist am Ende des Larvenstadiums die Larve ungefähr 8 cm lang. Der eigentliche Körper ist 3 cm lang und der Rest besteht aus dem stark entwickelten Ruderschwanz. Während eines fünfwöchentlichen Hungers wird nun der Schwanz vollständig aufgezehrt und auf seine Kosten wachsen an dem Rumpf die Beine hervor.

4c) Der Stoffumsatz im Hungerzustand. Sowohl die Versuche an Menschen wie an Tieren haben ergeben, daß der Stoffumsatz entsprechend der Abnahme des Körpergewichts von Tag zu Tag sinkt. Wenn man aber den Stoffverbrauch auf 1 kg Körpergewicht berechnet, so zeigt sich eine auffallende Konstanz. Ausführliche Angaben über die Größe dieses Umsatzes finden sich bei Brugsch, Der Hungerstoffwechsel in Oppenheimers Handbuch der Biochemie Bd. IV, 1 S. 285 und bei Tigerstedt in Nagels Handbuch der Physiologie Bd. I S. 379. Für den Menschen ergab ein genauer Stoffwechselversuch von Benedict einen Verbrauch von ungefähr 30 Kal. pro kg Körpergewicht in den ersten 7 Hungertagen. Verschieden große Tiere haben pro kg Körpergewicht einen verschieden großen Umsatz, der bei kleineren Tieren wegen der relativ größeren Oberfläche größer ist, z. B. bei Meerschweinchen 152,6 Kal. bei Hunden von verschiedener Größe 36, 45, 55 Kal. pro kg Körpergewicht.

Die Stoffwechselversuche im Hungerzustande gestatten nun auch einen Rückschluß auf den Verbrauch an Nährstoffen, Eiweiß, Fett und Kohlehydrate während desselben. Dies geht sowohl aus der Untersuchung der täglichen Stickstoffausscheidung, wie aus der Bestimmung des Gaswechsels und der Größe des respiratorischen Quotienten hervor.

Uebereinstimmend haben Untersuchungen an hungernden Menschen und Tieren gezeigt, daß am ersten Hungertage Glykogen in größerer Menge verbrannt wird, später aber nur in weit geringerem Maße. Die Fettzersetzung erreicht ihr Maximum am zweiten oder dritten Tage und nimmt dann allmählich langsam ab. Die Eiweißzersetzung nimmt allmählich mit abnehmendem Körpergewicht ab und als ihr Maß auch die Stickstoffausscheidung im Harn.

Diese Abnahme ist nicht immer gleichmäßig und regelmäßig. Am ersten Hungertage ist nach Versuchen an Fleischfressern die Eiweißzersetzung am größten und zwar um so größer, je größer die Eiweißmenge in der vorhergehenden Nahrung gewesen ist. Auch beim Menschen hat man dieselben Beobachtungen gemacht und die allmähliche Abnahme der Eiweißzersetzung auf ein bestimmtes Minimum konstatiert. Man hat beim Menschen aber zuweilen beobachtet (Prausnitz), daß am zweiten und dritten Hungertage die Eiweißzersetzung wieder zunimmt. Diese Beobachtung hat ihren Grund darin, daß am ersten Hungertage größere Mengen von Glykogen verbrannt werden und dieser Glykogenverbrauch eine eiweißsparende Wirkung ausübt. Am zweiten und dritten Tage fällt diese Wirkung weg, und es wird jetzt wieder mehr Eiweiß zersetzt und die Stickstoffausscheidung steigt wieder an. Dadurch nimmt die Eiweißmenge des Körpers wieder ab und die Eiweißzersetzung sinkt in den folgenden Tagen wieder. Man hat an hungernden Tieren ferner gefunden, daß der Fettgehalt des Tieres einen Einfluß auf die Eiweißzersetzung ausübt. Der größte Teil des Energiebedarfs im Hunger wird durch Fett gedeckt. Nach den Untersuchungen von Voit und Rubner fallen beim Hund ungefähr 10 bis 16% auf den Eiweißzerfall und 84 bis 90% auf die Fettzersetzung, wenn das Hungertier genügend großen Fettgehalt bei Beginn der Hungerperiode hat. Ist aber das Tier von Anfang an fettarm oder aber das Tier im Verlauf des Hungers relativ fettarm geworden, und der Fettgehalt unter einen gewissen Wert gesunken, dann beobachtet man wieder eine Steigerung der Eiweißzersetzung, die sich auch durch eine Steigerung der Stickstoffausscheidung dokumentiert. Ueber die Deutung dieser „prämortalen Stickstoffsteigerung“ sind die Ansichten noch geteilt, ob es sich nach Voit um eine relative Fettarmut. oder nach Schulz um ein plötzlich stattfindendes Absterben von Zellen oder nach Tigerstedt um eine Art Autointoxikation handelt.

4d) Aenderungen der Zusammensetzung der Organe und der Ausscheidungen während des Hungers. Die ausgeprägteste Veränderung in der chemischen Zusammensetzung der Organe beim Hunger ist die infolge des großen Fett-

umsatzes eintretende Abnahme des Fettgehaltes derselben. Der Fettgehalt des ganzen Körpers kann bei lange hungernden Hunden bis auf 1% heruntersinken (Schulz, Schöndorff) und zwar enthalten die drüsigen Organe mehr Fett wie die Muskeln. Der Wassergehalt der Organe nimmt dagegen beim Hunger in sehr vielen Fällen bedeutend zu; besonders zeigt sich diese Erscheinung bei den Knochen (Schöndorff). Da sich aus den Bilanzversuchen ergeben hat, daß bei Beginn des Hungers besonders das Glykogen verbraucht wird, so nahm man an, daß es möglich sei, hungernde Tiere sehr rasch durch Hungern glykogenfrei zu machen. Aber durch die Untersuchungen von Pflüger ist nachgewiesen, daß diese Annahme nicht richtig ist. Bei einem Hunde von 33 kg, der 28 Tage hungerte, konnte er noch 52,5 g Glykogen nachweisen. Ein anderer Hund enthielt nach 73 tägigem Hunger noch 1,2% Glykogen in der Leber, ein dritter nach 70 Tagen noch 0,03%. Es handelt sich in diesen Fällen wahrscheinlich um eine Neubildung von Glykogen aus Eiweiß oder Fett, eine Annahme, die auch durch andere Versuche gestützt wird.

Die Sekretion der Verdauungssäfte ist beim Hunger auf ein Minimum beschränkt, hört aber nie vollständig auf; darauf weist schon das Vorhandensein und die Beschaffenheit des Hungerkotes hin.

Die Harnausscheidung dauert, wie wir oben schon gesehen haben, während des Hungers fort. Die Harnmengen sind wegen des geringen Wasserbedürfnisses verhältnismäßig klein. Eine auffallende Veränderung zeigt die Verteilung des Stickstoffs im Harn. Während bei gemischter Nahrung ungefähr 85% des Stickstoffs in Form von Harnstoff ausgeschieden werden, sinkt diese Menge im Hunger auf 70%, ja in einzelnen Fällen bis auf 54%. Dagegen zeigt sich eine bedeutende Vermehrung der Ammoniakausscheidung. Die Menge der anorganischen Bestandteile des Harns entspricht den Mengen des eingeschmolzenen Körpermaterials.

5. Der Stoffwechsel im Winterschlaf. Eine dem beim Menschen und höheren Säugetieren doch nur zufällig vorkommenden Hungerzustande ähnliche Erscheinung ist der Winterschlaf gewisser Säugetiere, welche im Winter das Vermögen einbüßen, ihre Körpertemperatur zu bewahren und sich wie wechselwarme Tiere verhalten, d. h. die Temperatur des Körperinneren der Temperatur ihrer Umgebung anpassen. Bei den niederen Tieren, Insekten, Mollusken, Reptilien, Amphibien, zahlreichen Fischen dauert ein derartig physiologischer Hungerzustand während des ganzen Winters an. Der Stoffwechsel stellt sich auf ein so niedriges Niveau ein, daß das Leben fast vollständig erloschen scheint. Zu den Säugetieren, welche in den Winterschlaf verfallen, gehören die Fledermaus, der Igel, der Ziesel, das Murmeltier, der Siebenschläfer, die Haselmaus und der Hamster. Im allgemeinen gehören also zu den Winterschläfern solche Tiere, die von einer Nahrung leben, die sie im Winter schwer oder gar nicht beschaffen können. Sie ziehen sich dann im Winter an Orte zurück, die der Kälte nicht so sehr ausgesetzt sind, verfallen in eine Art soporösen Zustand, in dem die Verbrennungsgröße so unbedeutend ist, daß sie lange Zeit auf Kosten ihrer eigenen Körpersubstanz existieren können. Eine ausführliche Darstellung über den Winterschlaf findet sich in dem Artikel „Hibernation" von J. Athanasiu in Richets Dictionnaire de Physiologie, Paris 1909, bei L. Merzbacher „Allgemeine Physiologie des Winterschlafs in Ergebnisse der Physiologie Bd. III Abt. 2 S. 214 (1904), und bei R. Tigerstedt in Wintersteins Handbuch der vergl. Physiologie Bd. III, 2 S. 69. Wir wollen hier nur die Stoffwechselveränderungen, die sich bei den winterschlafenden Säugetieren zeigen, in den Bereich unserer Betrachtungen ziehen.

Besonders gekennzeichnet ist der Winterschlaf, wie schon erwähnt, durch das Versagen der Temperaturregulierung, indem „das Nervensystem der winterschlafenden Säugetiere unter dem Einfluß einer etwas niedrigen Außentemperatur im Verein mit anderen uns noch nicht bekannten Umständen das Vermögen einbüßt, in der gewöhnlichen Weise die Vorgänge bei der Wärmeregulierung zu beherrschen. Das Tier verhält sich wie ein poikilothermes Tier, nur mit dem Unterschiede, daß die nervösen Zentralorgane in jedem Moment bereit sind, das verlorengegangene Wärmeregulationsvermögen wieder zu entfalten, selbst wenn die Temperatur auf Null herabsinkt" (Tigerstedt). Die Körpertemperatur kann auf 20 bis 30° C unter die normale sinken. Beim Aufwachen kann die Temperatur sehr schnell ihre normale Größe wieder erreichen.

Mit dem allgemeinen Sinken des Stoffwechsels sind auch die übrigen Funktionen des Winterschläfers in bedeutendem Maße verändert. Die Zirkulation des Blutes verlangsamt sich, der Blutdruck ist sehr niedrig, die Zahl der Herzschläge sehr gering. Die Frequenz der Atembewegungen ist stark herabgesetzt. Bei einzelnen Winterschläfern hat man direkt lang dauernde Atemstillstände beobachtet. Die Oxydationsprozesse sind ganz bedeutend herabgesetzt. Die Menge der abgegebenen Kohlensäure ist nach den neuesten Untersuchungen von Nagai (Zeitschr. f. allgem. Physiol. Bd. 9 S. 366 (1909)) etwa 90 mal, diejenige des aufgenommenen Sauerstoffs etwa 20 mal ge-

ringer als im Wachzustande. Der respiratorische Quotient ist zwar niedriger, als man bei normaler Fettverbrennung erwarten müßte (0,54 beim Murmeltier, 0,57 beim Siebenschläfer und 0,53 beim Igel), jedoch lange nicht so niedrig, als man bisher allgemein annahm (Pembrey 0,226 bis 0,5, Regnault und Reiset 0,399, Valentin 0,44). Auch Hari (Pflügers Archiv 130, S. 112 (1909)) fand in sorgfältig durchgeführten Respirationsversuchen an winterschlafenden Fledermäusen, indem er die Messung des Gaswechsels erst vornahm, wenn das Versuchstier viele Wochen in ruhigem Winterschlaf zugebracht hatte, respiratorische Quotienten, die zwischen 0,652 und 0,696 schwankten und im Mittel 0,681 betrugen. Das sind dieselben Werte, die man beim hungernden Menschen beobachtet und so gedeutet hat, daß bei vorwiegender Verbrennung von Fett eine geringe Menge Kohlehydrat (Glykogen) aus Fett oder Eiweiß gebildet worden ist. Reach (Biochemische Zeitschr. 26, 391 (1910)) fand bei seinen Untersuchungen an Fledermäusen, daß eine Bildung von Glykogen nicht stattfand, sondern vielmehr Glykogen zersetzt wurde, daß sich aber sowohl Glykogen wie Fett in der Leber anhäuft. An Weinbergschnecken beobachtete Schöndorff (Pflügers Archiv 146, 151 (1912)), daß während des Winterschlafes der Glykogengehalt derselben konstant blieb. Unter Ausschaltung der individuellen Unterschiede (200 Tiere zu jeder Analyse) fand er einen Glykogengehalt von 1,8% in der feuchten Substanz und 9% in der Trockensubstanz. Eine Anhäufung des Glykogens in der Leber (Mitteldarmdrüse) ließ sich nicht feststellen. Nagai sucht die abnorm niedrigen Werte des respiratorischen Quotienten auf eine zu kurze Versuchsdauer oder auf andere Versuchsfehler der früheren Forscher zurückzuführen. Nach seiner Ansicht verlaufen die Oxydationsprozesse unvollständig und es verläßt nicht aller Kohlenstoff in Form von Kohlensäure, sondern in Form von irgendwelchen intermediären Stoffwechselprodukten den Körper. Eine Stütze seiner Ansicht findet er in der gewaltigen Verschiebung der Stickstoffverteilung im Harn, die in einer Vermehrung der Aminosäurenfraktion und einer Verminderung der Harnstofffraktion sich äußert. Im Harn des winterschlafenden Murmeltieres findet er nur 18% des Stickstoffs der Harnstofffraktion und 66% in der Aminosäurefraktion, während beim wachen Tiere sowohl bei der Fütterung als im Hunger die entsprechenden Zahlen 60 bis 65% und 20% sind. Auch das Vorkommen von Milchsäure im Harn während der Schlafperiode und das Verschwinden derselben im wachen Zustande spräche für abnorme Spaltungen. Zuntz (Oppenheimers Handbuch der Biochemie IV, 1, 861 1911) sucht die abnormen, niedrigen respiratorischen Quotienten im Winterschlaf durch eine Retention von Kohlensäure zu deuten, weil sich in allen mitgeteilten Versuchen zwischen die niedrigen auch wieder normale respiratorische Quotienten einschieben und die ersteren sich besonders dann finden, wenn auf eine unruhige Periode des Tieres eine solche tiefen ruhigen Schlafes folgt. Beim Erwachen steigt die Temperatur des Tieres rasch wieder auf die normale Höhe und ebenso rasch steigen die Oxydationsprozesse. Der respiratorische Quotient steigt manchmal auf 1 und da der Glykogengehalt der Tiere dabei sehr rasch sinkt, handelt es sich wahrscheinlich um eine bedeutende Steigerung der Kohlehydratverbrennung, die die Erwärmung des Tieres verursacht.

6. Der Grundumsatz oder Erhaltungsumsatz im Wach- und Schlafzustande. Um eine Vorstellung davon zu gewinnen, wie die verschiedenen Faktoren auf den Stoffwechsel wirken, darf man nicht von dem Stoffwechselminimum im Hungerzustande ausgehen, sondern muß den Stoffwechsel im nüchternen Zustande bei gleichförmiger, mittlerer Temperatur, möglichst vollständiger Muskelruhe und Untätigkeit der Verdauungsorgane als Grundlage nehmen. Dieser Stoffumsatz, Grundumsatz oder Erhaltungsumsatz genannt, ist nun dadurch ausgezeichnet, daß er für jedes erwachsene Individuum eine konstante Größe darstellt, die jahre- und jahrzehntelang konstant bleibt, solange sich nicht die stoffliche Zusammensetzung des Individuums wesentlich ändert (Loewy). Die Differenzen in der körperlichen Beschaffenheit des Individuums sind die Ursache, daß diese Größe bei Individuen derselben Tierart verschieden ist. Der Erhaltungsumsatz zeigt auch keine deutlichen, an die Tageszeit gebundenen Schwankungen. Beobachtungen von Johannsson ergeben in zweistündigen Versuchen eine mittlere Ausscheidung von 22,2 ccm Kohlensäure pro Stunde. Die Abweichungen betrugen nicht mehr wie 3,6% vom Mittel. Für den Menschen von etwa 70 kg Körpergewicht fand man einen Verbrauch von 1680 Kal. in 24 Stunden oder 1 Kal. pro Kilogramm Körpergewicht und Stunde. Auch bei Tieren konnte man dieselbe Konstanz im Erhaltungsumsatz sicherstellen.

Man hatte früher behauptet, daß im Schlafzustande ein bedeutender Abfall der Oxydationsprozesse stattfände. Aber neuere Versuche von Magnus-Levy, Loewy, Johansson und anderen schwedischen Forschern, Atwater, Wood und Benedict, die nach den verschiedensten Methoden ausgeführt wurden, zeigten übereinstimmend,

daß der Schlaf auf die Oxydationsprozesse keinen Einfluß ausübt. Die früher beobachteten Unterschiede beruhen ausschließlich auf der großen Muskelruhe im Schlaf.

7. Der Stoffwechsel bei Zufuhr von Nahrung. Wenn man nach Zuntz einem hungernden Tier, bei welchem man die chemische Wärmeregulation durch hinreichende, hohe Umgebungstemperatur ausgeschaltet hat, Nahrung zuführt, so beobachtet man eine Steigerung des Stoffumsatzes, die je nach der Nahrung verschieden groß ist; dieselbe ist am deutlichsten kurz nach der Nahrungsaufnahme zu erkennen. Nach den Untersuchungen von Magnus-Levy beträgt die Steigerung bei Zufuhr von Fett ungefähr 2%, bei Zufuhr von Stärke ungefähr 9%, bei Zufuhr von Eiweiß etwa 17% der Gesamtenergiemenge.

Was ist nun die Ursache dieser Steigerung des Stoffumsatzes? Zunächst ist die Steigerung bedingt durch die durch die Nahrungsaufnahme gesteigerte Arbeit des Herzens, der Niere und durch gewisse chemische Prozesse, welche sich beim Uebergang der Nährstoffe in die Zellen vollziehen. Dieses läßt sich dadurch beweisen, daß man die Nährstoffe mit Umgehung des Verdauungskanals direkt in die Blutbahn bringt. In diesen Fällen beobachtete man stets auch eine Steigerung der Oxydationsprozesse. Besonders große Wirkung übten die Abbauprodukte des Eiweißes (Aminosäuren usw.) aus. Von Rubner ist deshalb der Begriff der „spezifisch-dynamischen“ Wirkung der Nährstoffe, der bei Eiweißstoffen besonders zutage tritt, eingeführt worden, während Fette und Kohlehydrate eine bedeutend geringere Wirkung ausüben. Der zweite Faktor, der die Steigerung des Stoffwechsels bewirkt, ist nach Zuntz die Verdauungsarbeit, denn wenn man die Stoffe, die bei der Einführung in die Blutbahn den Stoffumsatz steigern, in den Magen einführt, so ist der Umsatz noch größer. Am deutlichsten macht sich der Einfluß der Verdauungsarbeit bemerkbar, wenn die mechanische Beschaffenheit der Nahrung starke Bewegungen des Verdauungsapparates und starke Absonderung der Verdauungsdrüsen verursacht. So hat man z. B. bei Hunden, die mit Knochen gefüttert wurden, eine Steigerung des Sauerstoffverbrauchs bis um 30% viele Stunden hindurch beobachtet. Wenn man bei Pflanzenfressern (Pferd und Rind) einmal die Nahrung in Form leicht verdaulicher reiner Nährstoffe gibt, ein anderes Mal in Form des gewöhnlichen Rauhfutters, das durch seinen großen Gehalt an Cellulose die Verdauungsorgane sowohl beim Kauen als auch bei der Weiterbewegung der Nahrung sehr in Anspruch nimmt, so ist der Gaswechsel um 30 bis 40% gesteigert.

7a) Der Stoffwechsel bei Zufuhr von Eiweiß. Unter den organischen Nährstoffen, den Eiweißstoffen, den Fetten und den Kohlehydraten nimmt das Eiweiß deshalb eine dominierende Stellung ein und ist in allererster Linie zu besprechen, weil die Fütterung mit Eiweiß allein, wenn es in genügender Menge gegeben wird, um den Energiebedarf zu decken, imstande ist, alle Bedürfnisse eines tierischen Organismus zu bestreiten und ihn im Stoffwechselgleichgewicht zu erhalten. Man kann einem Tiere noch so viel Kohlehydrate und Fette in der Nahrung geben, so verbraucht der Körper andauernd von seinem eigenen Eiweißbestand und schließlich geht das Tier zugrunde, wenn auch der Tod nicht so schnell eintritt, als wenn das Tier ohne jegliche Nahrung bleibt, also hungert. Andererseits beweist der bekannte Versuch von Pflüger, der einen Hund $^3/_4$ Jahr lang mit magerstem Fleisch fütterte, dessen Gehalt an Fett und Glykogen so gering war, daß er für die Erzeugung der Herzarbeit nicht genügte, und dabei den Hund täglich die schwerste Arbeit (bis zu 100000 kgm) durch Ziehen eines schweren Wagens leisten ließ, daß es möglich ist, ein Tier, welches so große Mengen von Fleisch (2000 bis 3000 g) verdauen kann, durch alleinige Zufuhr von magerstem Fleisch, d. i. von Eiweiß, nicht nur zu erhalten, sondern ihm auch die für die gewaltige Muskelarbeit notwendigen Energiemengen zu liefern.

Wenn man einen Fleischfresser (Hund) mit gerade soviel magerstem Fleisch füttert, als er für seinen Bedarf nötig hat, so wird alles Eiweiß umgesetzt, und der Hund scheidet ebensoviel Stickstoff aus, als er einnimmt, befindet sich also im Stickstoffgleichgewicht. Wird nun bei einem solchen Hund ein Plus von Eiweiß in der Nahrung gegeben, so wird in den meisten Fällen der größte Teil dieses Eiweißes im Körper zersetzt und nur bei sehr großer Eiweißzufuhr ein ganz geringer Teil im Körper als Fleisch angesetzt. Vermehrte Eiweißzufuhr steigert also den Eiweißzerfall und mit der Steigerung des Eiweißzerfalls geht auch eine Steigerung des Gesamtstoffumsatzes einher, jedoch ist die Steigerung der Eiweißzersetzung bedeutend größer als die des Gesamtstoffwechsels. Dies geht besonders deutlich aus Bilanzversuchen von Voit an einem Hunde hervor, deren Resultate in folgender Tabelle nach Zuntz zusammengestellt sind, (der Uebersichtlichkeit halber ist der im Harn ausgeschiedene Stickstoff auf die ihm entsprechende umgesetzte Fleischmenge berechnet, 3,3 g N = 100 g frisches Fleisch):

Fleisch verzehrt	Fleisch zersetzt	Fleisch-ansatz	Wärmeproduktion in Kal.		
			aus Eiweiß	aus Fett	im ganzen
0	165	− 165	142	819	961
500	599	— 99	515	428	943
1000	1079	− 79	928	173	1101
1500	1500	0	1290	− 36	1254
1800	1757	+ 43	1511	− 10	1501
2500	2512	− 12	2100	− 519	1041

Auf die Größe der Eiweißzersetzung wirkt auch der Eiweißbestand des Körpers ein. Füttert man einen Hund mit großen Mengen Eiweiß und erhöht dadurch den Eiweißbestand des Körpers, so nimmt auch das Eiweißbedürfnis desselben zu, d. h. es muß in der Nahrung mehr Eiweiß gegeben werden, um einen Eiweißverlust des Körpers zu verhindern, so daß Stickstoffgleichgewicht besteht. Gibt man einem solchen Tiere wieder weniger Eiweiß in der Nahrung, so verliert der Körper von seinem eigenen Körpereiweiß so viel, bis wieder Stickstoffgleichgewicht eintritt. Von einer gewissen unteren Grenze an stellt sich aber ein Gleichgewichtszustand zwischen dem zugeführten und zersetzten Eiweiß nicht mehr ein, der Körper zersetzt fortwährend von seinem eigenen Eiweiß, bis schließlich der Hungertod eintritt. Die Frage nach der geringsten Menge von Eiweiß, die für den normalen Stoffwechsel des Menschen notwendig ist, mit der der Körper sich also noch in Stickstoffgleichgewicht setzen kann, ist verschieden beantwortet worden. Aeltere Untersuchungen hatten ergeben, daß das „Eiweißminimum" bedeutend größer sei als die im Hunger zersetzte Eiweißmenge (118 g). Neuere Untersuchungen, besonders von Chittenden, zeigten aber, daß der menschliche Körper mit viel geringeren Eiweißmengen auskommen kann, ohne daß gleichzeitig eine übermäßige Zufuhr von stickstofffreien Nährstoffen stattfinden muß. In vielen Fällen genügten 70 bis 80 g, ja in manchen Fällen 50 g Eiweiß bei sich über Monate erstreckenden Versuchen. Andererseits geht aber auch aus allen Versuchen bei den verschiedensten Menschen und unter sonst gleichen Bedingungen hervor, daß große individuelle Schwankungen in dem Eiweißminimum vorkommen, die es nicht gestatten, eine bestimmte Größe des Eiweißminimums in allen Fällen für passend zu halten.

7b) Der Stoffwechsel bei Zufuhr von Fett und von Kohlehydraten. Während Zufuhr von Eiweiß sowohl den Eiweißumsatz wie den Gesamtstoffwechsel bedeutend steigert, ist dies bei Fettzufuhr in bedeutend geringerem Maße der Fall. Wenn man einem hungernden Tiere so viel Fett gibt, daß der ganze Energiebedarf durch Fett gedeckt ist, so beobachtet man eine Steigerung der Oxydation, die etwa 2½% des Energiebedarfs des Fettes beträgt. Der Eiweißzerfall kann aber durch Fett herabgesetzt werden und dadurch Eiweiß gespart werden, welches dann als Fleisch angesetzt wird, wenn auch die Eiweißersparnis nicht sehr groß ist. Die Kohlehydrate dagegen zeigen nicht nur eine starke eiweißsparende Wirkung, sondern bewirken auch eine starke Steigerung des Gesamtstoffwechsels. Aus den Versuchen von Voit, Landergreen, Benedict usw. ist der Schluß zu ziehen, daß die Kohlehydrate dem Fette entschieden als Eiweißsparer überlegen sind.

7c) Der Stoffwechsel bei Zufuhr von Leim, Abbauprodukten des Eiweißes, Aminosäuren und anderen stickstoffhaltigen Körpern. Zu den Eiweißsparern im weiteren Sinne des Wortes hat man auch die Stoffe gerechnet, die in ihrer Konstitution dem Eiweiß nahestehen und auch in den natürlichen Nahrungsmitteln in größerer oder geringerer Menge vorkommen. Zu diesen Stoffen gehört in erster Linie der in den tierischen Nahrungsmitteln vorkommende Leim, der beim Kochen des Bindegewebes entsteht und ungefähr $^1/_5$ des ganzen Stickstoffgehalts des Fleisches ausmacht. Der Leim kann das Eiweiß nicht vollständig in der Nahrung ersetzen; denn wenn man Hunde mit gemischter Nahrung füttert, in denen das Eiweiß, das genügt, um den Hund im Stickstoffgleichgewicht zu erhalten, vollständig durch Leim ersetzt wird, so verliert der Hund dauernd von seinem Körpereiweiß. Nach den Versuchen von Voit, Panum und Oerum, Munk, Kirchmann, Kaufmann kann der Leim nur Eiweiß sparen, wenn auch in viel weiterem Sinne als Kohlehydrate und Fette und zwar kann ungefähr $^1/_5$ des Eiweißes in der Nahrung durch Leim ersetzt werden. Nun sind im Leim die aromatischen Gruppen des Eiweißes, Tyrosin und Tryptophan gar nicht und nur in geringen Spuren die schwefelhaltigen Gruppen (Cystin. S. den Artikel „Eiweißkörper")

vorhanden. Kaufmann hat deshalb versucht, ob es möglich sei, das Eiweiß vollständig durch Leim zu ersetzen, wenn man dem Leim die fehlenden Bestandteile in der geeigneten Menge zufügt. Wenn er den Eiweiß-N durch 93% Leim-N, 4% Tyrosin-N, 2% Cystin-N und 1% Tryptophan-N ersetzte, so zeigte sich eine dem Eiweiß physiologische nahezu gleiche Wertigkeit des mit den Aminosäuren versetzten Leims. Nachprüfungen von Michaelis und Rona konnten aber dieses Resultat nicht bestätigen.

Bezüglich des Nährwertes der Albumosen und Peptone widersprechen sich die Angaben in der Literatur, was nach Hammarsten zum Teil wohl daher rührt, daß, da ja dieselben durch Spaltung entstehen, in ihnen vielleicht wichtige Atomkomplexe fehlen, die für die Regeneration besonderer Eiweißstoffe notwendig sind.

Mit der Vervollkommnung unserer Kenntnisse über die Konstitution der Eiweißkörper, über die Abbauprodukte derselben sowohl im Darm wie durch künstliche Spaltungen, über die Verkuppelung einfacher Bausteine derselben zu komplexen Verbindungen usw. (siehe den Artikel „Eiweißkörper“), über die Synthese des im Darm tief abgebauten Eiweißes wieder zu Arteiweiß, war es natürlicherweise von allergrößtem Interesse, die Frage zu entscheiden, ob es möglich sei, das Eiweiß der Nahrung durch tiefabgebautes Eiweiß oder Aminosäuregemisch zu ersetzen. Die Versuche sind von Loewi zuerst ausgeführt und besonders von Abderhalden und seinen Schülern im weitestem Umfange, besonders an Hunden fortgesetzt worden. Es wurde festgestellt, daß diese längere Zeit nicht nur ihren Stoffwechsel im Gleichgewicht halten können, sondern sogar erhebliche Gewichtszunahmen aufweisen, wenn als einzige Nahrung die einfachsten Bausteine der Nahrung verabreicht werden (E. Abderhalden, Synthese der Zellbausteine in Pflanze und Tier. Berlin 1912). Unter Bausteinen sind nach Abderhalden die Abbaustufen der zusammengesetzten Nahrungsstoffe zu verstehen, die bei der vollständigen hydrolytischen Spaltung übrig bleiben. Die längste Dauer der Versuche betrug 74 Tage. Neuerdings (Zeitschr. f. physiologische Chemie Bd. 83 S. 445, 1913) ist dann Abderhalden der Versuch gelungen, einen Hund über ein Vierteljahr mit vollständig abgebautem Fleisch zu ernähren. Das verfütterte Präparat enthielt ausschließlich Aminosäuren neben Salzen, geringen Mengen von Kreatin und Kreatinin, ferner Fettsäuren, geringe Mengen von Traubenzucker und Nukleosiden. Phosphatide und ungespaltene Fette waren nicht anwesend, wohl aber deren Bausteine. Als Kohlehydrate wurde Rohrzucker gegeben; an Stelle des Fettes anfangs Glyzerin und Stearin-, Palmitin- und Oelsäure, später wegen Diarrhöen stickstofffreier Speck. Der Hund nahm während 100 Tage 9900 g an Gewicht zu. Die Versuche an Pflanzenfressern. Kaninchen, Ratten und Mäusen führten noch nicht zu einem ähnlichen Ergebnisse, aber Abderhalden hält es nicht für ausgeschlossen, sondern sogar für wahrscheinlich, daß es auch bei diesen Tieren gelingt, die Nahrungsstoffe durch die einfachsten Bausteine zu ersetzen.

Um die Frage zu entscheiden, welche Aminosäuren ersetzbar sind, d. h. welche Aminosäuren der Hund selbst bilden kann, wurde bei einem Versuch dem tief abgebauten Kasein das Tryptophan bis auf 0,1% entzogen; das Tier nahm über 1 kg an Gewicht ab. Dann wurde das entzogene Tryptophan wieder zugesetzt, das Gewicht blieb konstant. In einer anderen Periode wurde derselbe Versuch mit Tyrosinentziehung mit demselben Resultate gemacht; Gewichtsabnahme bei Fehlen von Tyrosin, Gewichtszunahme bei Hinzufügen von Tyrosin. Es dürfen also Tryptophan und Tyrosin in der Nahrung nicht fehlen.

Während also ein Gemisch von Aminosäuren, in welchen alle Bausteine enthalten sind, vollständig die normalen Nährstoffe ersetzen kann, ist es bisher noch unentschieden, ob auch einzelne Aminosäuren, Amide, z. B. Asparagin oder andere im Tier- und Pflanzenreich vorkommende stickstoffhaltige Stoffe im Organismus verwertet werden können, besonders da sich hier Fleisch- und Pflanzenfresser verschieden verhalten. Die von Grafe (Zeitschr. f. physiol. Chemie Bd. 77 S. 1 1912) behauptete Fähigkeit des Organismus, aus Ammoniaksalzen und Kohlehydraten Eiweiß zu bilden, wie er dies aus den Stickstoffretentionen bei Fütterung derselben schloß, ist von Abderhalden ganz entschieden bestritten worden.

8. Einfluß des Wassers und der Salze auf den Stoffwechsel. Unter normalen Verhältnissen wird die in der Nahrung zugeführte Wassermenge im Harn wieder ausgeschieden, ohne irgendwie den Stoffwechsel zu beeinflussen. Wenn man aber dem Körper abnorm große Mengen von Wasser zuführt, so wird das Wasser zwar auch rasch durch den Harn resp. den Schweiß wieder ausgeschieden; man beobachtet aber auch gleichzeitig eine vermehrte Stickstoffausscheidung. Man erklärt diese Vermehrung entweder durch eine einfache Ausspülung der Gewebe oder aber nach Voit und Heilner durch eine Steigerung des Eiweißstoffwechsels. Länger dauernde Wasserentziehung ist bei Tieren immer mit einer Steigerung

des Eiweißzerfalls verbunden. Ueber die Wirkung der Salze auf den Stoffwechsel sind die Ansichten noch strittig. Kleinere Salzmengen wirken überhaupt nicht auf den Stoffwechsel, größere Salzmengen nur dann, wenn durch das Uebermaß der Salze den Geweben Wasser entzogen wird. Wenn man durch Zufuhr von Wasser der austrocknenden Wirkung der Salze entgegenarbeitet, so findet sogar eher eine Herabsetzung des Eiweißstoffwechsels statt.

9. **Einfluß des Alkohols auf den Stoffwechsel.** Durch eine größere Reihe neuerer Untersuchungen, besonders von Atwater und Benedict, Neumann, Rosemann u. a. ist als sicher bewiesen worden, daß der dem Organismus zugeführte Alkohol bis auf einige wenige Prozent, die durch die Atmung und durch den Harn ausgeschieden werden, im Körper zu Kohlensäure und Wasser verbrennt. Da nun die Verbrennungswärme des Alkohols = 7,0 Kal. beträgt, so könnte nach dem Isodynamiegesetz der Alkohol entsprechend seinem Brennwert für andere Nährstoffe eintreten, also sparend wirken. Dies ist in der Tat der Fall. Er wirkt nicht nur sparend auf Fett und Kohlehydrate, sondern auch auf Eiweiß, wenn man auch manchmal anfangs, besonders bei nicht an Alkohol Gewöhnten einen toxischen Eiweißzerfall beobachtet, und erst bei länger dauernden Versuchen die Sparwirkung des Alkohols für Eiweiß deutlich zutage tritt. Die Oxydationsprozesse erfahren durch Alkohol keine wesentliche Aenderung bei mäßigen Gaben von Alkohol, nur die Kohlensäureausscheidung sinkt ein wenig entsprechend dem respiratorischen Quotienten bei der Verbrennung von Alkohol. Der Nährwert des Alkohols ist natürlich nur ein beschränkter, da größere Dosen toxisch wirken. Er kann aber in Ausnahmefällen besonders bei fieberhaften Erkrankungen von großer praktischer Bedeutung sein.

10. **Der Stoffwechsel bei überschüssiger Nahrungszufuhr (Mast).** 10a) Der Ansatz von Eiweiß (Fleischmast). Ein Ansatz von Körpersubstanz, eine Mästung des Körpers kann nur entstehen, wenn eine das Bedürfnis übersteigende Nahrungszufuhr stattfindet. Ein Ansatz von Eiweiß, eine Fleischmast durch überschüssige Zufuhr von Eiweiß herbeizuführen, ist nur beim Fleischfresser möglich und auch hier nur in geringem Maße. Wir haben ja oben schon gesehen, daß der große Teil des überschüssig zugeführten Eiweißes zersetzt wird und nur ein ganz geringer Teil zum Ansatz kommt. Nach Voit betrug die größte Menge Fleisch, die er bei seinem Hunde zum Ansatz bringen konnte, 1365 g; im Durchschnitt konnte er höchstens einen Ansatz von 500 g Fleisch erreichen.

Beim Menschen und beim Pflanzenfresser, die ihren Bedarf nicht allein durch Eiweiß decken können, ist dies nicht möglich, weil dieselben solche großen Eiweißmengen, um einen Fleischansatz zu erzielen, nicht verzehren können. Für die Omnivoren ist ein Eiweißansatz nur zu erreichen, wenn in der Nahrung außer größeren Mengen von Eiweiß ein Ueberschuß von Fett und Kohlehydraten gegeben wird. Um den größten Eiweißansatz zu erreichen, ist es nach den Versuchen von Voit am besten, eine im Verhältnis zu der gegebenen Eiweißmenge ziemlich große Fettmenge zu geben. In ähnlicher Weise wirken auch die Kohlehydrate, nur daß ihre eiweißsparende Wirkung ja größer ist wie die einer isodynamen Menge Fett. Beim Erwachsenen scheint ein reichlicher Ansatz von Fleisch auf die Dauer durch einfache Ueberernährung nach den vorliegenden Versuchen schwer zu erreichen sein, wenn es auch nach den Versuchen von Krug, Lüthje, Dapper u. a. nicht ausgeschlossen ist. Durch ausgiebige Muskelarbeit und Muskelübung (Training) läßt sich der Fleischansatz bedeutend steigern. Beim wachsenden Individuum, bei dem an dauernde Muskelarbeit Gewöhnten, bei Rekonvaleszenten nach langdauernder Erkrankung, nach Hunger und Unterernährung tritt eine Eiweißmast sehr leicht ein.

10b) Der Ansatz von Fett (Fettmast) und der Ursprung des Fettes im Tierkörper. Bei der Erörterung der Bedingungen für den Ansatz von Fett (Fettmast) ist zunächst festzustellen, aus welcher Quelle das im Körper angesetzte Fett stammt. Ein Teil des Körperfettes stammt direkt aus dem zugeführten Nahrungsfett. Dies geht einwandfrei aus den Bilanzversuchen von Voit und Pettenkofer hervor, und aus Versuchen von Hofmann, der Hunde so lange hungern ließ, bis sie ihr Körperfett ungefähr eingebüßt hatten und sie dann mit geringen Mengen von Eiweiß und großen Mengen von Fett fütterte. Er fand dann bei der nach dem Tode erfolgten Untersuchung so große Mengen von Fett, daß dieselben, selbst eine Bildung von Fett aus Eiweiß angenommen, unmöglich aus dem zugeführten Eiweiß entstehen konnten, sondern zum größten Teil aus dem Nahrungsfett stammen mußten. Ein weiterer Beweis für die Abstammung des Körperfettes aus dem Nahrungsfett liegt in dem Ergebnis der Versuche von Munk, der Hungerhunde mit Rüböl und Fleisch fütterte und nachher die Erucasäure, die Fettsäure des Rüböls, die im normalen Hundefett nicht vorkommt, im Hundefett nachwies. Auch Hammelfett, Leinölfett konnte man bei Fütterung im Körperfett nachweisen. Auch jodierte Fette,

freie Fettsäuren, Seifen werden im Körper als Fett abgelagert.

Außer dem Nahrungsfett kommen die Kohlehydrate der Nahrung als Fettbildner in Betracht. Zwar hatte schon Liebig diese Auffassung vertreten, aber man hatte lange Zeit angenommen, daß aus den Kohlehydraten nicht direkt Fett gebildet wurde, sondern daß dieselben an Stelle des Fettes der Nahrung oder des aus Eiweiß gebildeten Fettes verbrannt würden und also eine fettsparende Wirkung hätten. Aber Mästungsversuche mit ausgesprochen kohlehydratreicher Nahrung am Schwein (Meissl und Stohmer, an der Gans (Bleibtreu), am Hund (Rubner) lassen keinen Zweifel mehr aufkommen, daß aus den überschüssig im Körper aufgenommenen Kohlehydraten Fett gebildet wird. Da die Kohlehydrate wesentlich mehr Sauerstoff enthalten als die Fette, muß natürlich zunächst eine Reduktion stattfinden, durch welche Sauerstoff abgespalten wird, der dann Oxydation unter Bildung von CO_2 bewirkt. Aus dem durch Reduktion und Oxydation gespaltenen Kohlehydratmolekül entstehen die Atomgruppen, aus welchen die Zelle das Fett synthetisch aufbaut, und Kohlensäure. Da nun ein Teil des Sauerstoffs aus dem Kohlehydratmolekül bei der Reduktion desselben stammt und nicht aus dem eingeatmeten Sauerstoff, so muß der respiratorische Quotient $\frac{CO_2}{O_2}$ erhöht sein. Bleibtreu sah bei Mästungsversuchen an Gänsen denselben bis zu 1,38 steigen.

Eine Bildung von Fett aus Eiweiß wird heutzutage wohl allgemein als nicht wahrscheinlich angenommen. Pflüger hat alle vorliegenden Beweise für die Fettbildung aus Eiweiß einer eingehenden Kritik unterzogen und kommt dabei zu dem Schluß, daß bisher kein einziger sicherer Beweis für die Fettbildung aus Eiweiß vorliegt, die an und für sich möglich wäre. Auch die Versuche von Kumagawa sprechen entschieden gegen eine derartige Bildung. Ob die neueren Versuche von Weinland an Calliphoralarvenbrei für die Säugetiere und den Menschen in seinem Sinne zu verwerten sind, mag dahingestellt bleiben.

Aus den obigen Auseinandersetzungen geht also hervor, daß für eine Fettmast nur eine Uebererernährung mit Kohlehydraten und Fetten in Betracht kommt. Wegen der besseren Ausnutzung des Fettes (79 bis 89%) kann man mit Fett am leichtesten mästen, doch leidet bei stärkerer Fettzufuhr die Verdauung und Ausnutzung der übrigen Nahrungsmittel. Die Kohlehydrate haben zwar nicht diese Nachteile, aber ihre Ausnutzung sowohl wie ihre Umwandlung in Fett geschieht mit einem Energieverluste, der etwa $^1/_3$ der in den Kohlehydraten der Nahrung enthaltenen Energiemenge beträgt. Da in der Ruhe ferner weniger Stoff zersetzt wird als bei Bewegung, so ist Körperruhe außer passender Nahrung ein geeignetes Unterstützungsmittel bei der Fettmästung.

10c) Der Ansatz von Kohlehydraten (Glykogenmast). Während bei einer das Bedürfnis übersteigenden Nahrungszufuhr in erster Linie Fett und in geringerem Maße Eiweiß auch bei länger dauernder Zufuhr zum Ansatz kommt, ist eine Anhäufung von Kohlehydraten in Form von Glykogen nur in den ersten Tagen der Mästung zu beobachten. Bei länger dauernder Zufuhr werden auch die überschüssigen Kohlehydrate der Nahrung als Fett abgelagert. Das Glykogen ist ein Reservenahrungsstoff, dessen Bestand im Körper je nach dem Bedürfnis im weitesten Maße wechselt. Ueber Glykogen und Glykogenbildung vgl. den Artikel „Leber“.

Bei Mästung auf Glykogen hat Schöndorff an Hunden durch Fütterung mit Fleisch, Reis, Kartoffeln und Rohrzucker die höchsten Werte bisher beobachtet, wobei natürlich nicht ausgeschlossen ist, daß es noch höhere Werte gibt. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle zusammengestellt:

Nr.	Körpergewicht	Glykogen in								Summa	Pro Körperkilo
		Blut	Leber	Muskulatur	Knochen	Eingeweide	Fell	Herz	Gehirn		
	kg	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
1	12,0	0,02	13,9	43,4	3,7	0,26	7,9	0,1	0,03	69,3	5,78
2	63,25	0,06	114,9	254,0	45,0	4,9	16,4	0,38	0,20	435,68	7,18
3	9,51	—	153,1	89,3	19,5	14,9	8,6	0,4	0,2	285,9	30,07
4	7,23	—	155,4	79,4	20,0	11,8	6,8	0,3	0,2	273,9	37,87
5	8,19	0,03	118,9	120,1	39,8	16,4	12,4	0,9	0,2	308,6	34,89
6	8,01		32,1	78,7	16,5	10,7	7,9	0,3	0,2	140,4	18,28
7	7,45		27,7	20,5	6,2	1,7	0,8	0,1	0,1	57,1	7,59

Was den Prozentgehalt der Organe an Glykogen betrifft, so mögen hier nur die Zahlen für die Leber und die Muskulatur angegeben werden, in denen die Hauptmenge des Glykogens enthalten ist.

Nr.	Glykogengehalt in %	
	Leber	Muskeln
1	4,35	0,72
2	7,6	0,88
3	18,69	2,54
4	17,1	3,23
5	16,4	3,72
6	9,9	2,53
7	7,3	0,76
8	15,0	—

Die höchsten Werte sind also für die Leber 18,69% und für die Muskulatur 3,72% und für das Körperkilogramm 37,87 g.

11. Der Stoffwechsel bei der Muskelarbeit. Schon Lavoisier hatte die Beobachtung gemacht, daß die Oxydationsprozesse bei der Muskelarbeit ganz bedeutend gesteigert sind; er konnte sowohl eine Steigerung des Sauerstoffverbrauchs wie der Kohlensäureausscheidung feststellen. Diese Tatsache ist von Voit und Pettenkofer für längere Zeitperioden bei kräftig arbeitenden Menschen bestätigt worden. Auch Zuntz und seine Schüler haben den Einfluß der Muskelarbeit auf den Gaswechsel bei verschiedenartigster Arbeit (Radfahren, Marschieren, Bergsteigen) untersucht und gefunden, daß schon im Beginn der Muskeltätigkeit eine Steigerung des Gaswechsels eintritt, die nach wenigen Minuten einen maximalen Wert erreicht. Sie zeigen auch die Beziehungen zwischen der Größe der Stoffzersetzung und nutzbarer Arbeit bei Menschen und Tieren unter den verschiedensten Bedingungen. Etwa ein Drittel der bei der Muskelarbeit entwickelten Energie erscheint als äußere Arbeit. Der respiratorische Quotient bleibt bei der Arbeit unverändert, nur bei ungenügender Sauerstoffzufuhr zu den Muskeln kann eine Steigerung desselben eintreten.

Eine große Streitfrage hat sich darüber erhoben, welches die Quelle der Muskelkraft ist, d. h. welche Nahrungsstoffe die für die Muskelarbeit notwendige Energie liefern. Von Liebig ist die Ansicht vertreten worden, daß das Eiweiß als alleinige Quelle der Muskelkraft zu betrachten sei. Wenn diese Ansicht richtig wäre, dann müßte man erwarten, daß durch die Mehrzersetzung des Eiweißes eine Vermehrung der Stickstoffausscheidung eintrete.

Eine große Anzahl daraufhin angestellter Versuche habe aber gezeigt, daß eine Vermehrung der Stickstoffausscheidung gar nicht oder nur in geringem Maße sich zeigt, in keinem Falle aber so groß ist, um die geleistete Arbeit auch nur zum kleinsten Teile durch die Zersetzung von Eiweiß zu erklären. Am einleuchtendsten ist in dieser Hinsicht ein Versuch von Fick und Wislicenus. Sie bestiegen vom Brienzer See aus das Faulhorn, dessen Spitze 1956 m über dem Wasserspiegel des Brienzer Sees liegt. Die Arbeit, die sie leisteten, betrug bei Fick (66 kg) 129096 kgm, bei Wislicenus (76 kg) 148656 kgm. Aus der Stickstoffausscheidung und dem zersetzten Eiweiß berechnete sich eine Arbeit von 63378 kg und 61280 kgm. Die Eiweißzersetzung deckte also nicht die Hälfte der geleisteten Steigarbeit, wobei die Arbeit des Herzens, der Atemmuskeln, des Hebens und Senkens der Beine bei jedem Schritt unberücksichtigt bleibt. Es muß also der Hauptanteil der Arbeit durch stickstofffreie Nährstoffe geleistet sein. Nun wäre es ja möglich, daß der Stickstoff des bei der Arbeit zersetzten Eiweißes nicht sofort zur Ausscheidung kommt, sondern erst später. Den in positiver Richtung ausgefallenen Versuchen von Argutinsky, Pflüger und Krummacher stehen spätere Versuche von Krummacher, Atwater und Benedict entgegen, bei denen sogar eine Verminderung der Stickstoffausscheidung am Tage nach der Arbeit beobachtet wurde. Aber andererseits beweist der schon erwähnte Versuch von Pflüger, der einen Hund monatelang mit magerstem Fleisch fütterte und dabei die schwerste Arbeit leisten ließ, daß in extremen Fällen, wenn dem Körper keine stickstofffreien Nährstoffe zur Verfügung stehen, die Arbeit allein auf Kosten von Eiweiß geleistet werden kann. Damit ist aber nicht gesagt, daß die Arbeit immer auf Kosten des Eiweißes geschieht; vielmehr weist die Steigerung der Kohlensäureausscheidung bei der Muskelarbeit, die durch die Untersuchungen von Voit und Pettenkofer, von Zuntz und seinen Schülern, Atwater und Benedict u. a. nachgewiesen ist, darauf hin, daß in der Regel die stickstofffreien Nahrungsstoffe, Fette und Kohlehydrate bei der Muskelarbeit verbrannt werden. Die Ansicht von Seegen, Chauveau und Laulanié, daß der Zucker die einzige Quelle für die Muskelkraft sei, und daß das Fett nicht direkt, sondern erst nach vorheriger Umwandlung in Zucker bei der Arbeit verarbeitet werde, ist von Zuntz und seinen Schülern und von Atwater und Benedict widerlegt worden.

Wir können also als Ergebnis aller Untersuchungen nur den Schluß ziehen, und zu dieser Auffassung hat sich auch später

Pflüger bekannt, daß sowohl Eiweißstoffe wie Fette und Kohlehydrate die Quelle der Muskelkraft sein können, und daß es nur auf die Art der Ernährung ankommt, welcher Stoff in erster Linie bevorzugt wird.

12. Die Abhängigkeit des Stoffwechsels von der Umgebungstemperatur und dem Luftdruck. Der Einfluß der Umgebungstemperatur auf den Stoffwechsel ist verschiedenartig, je nachdem wir es mit poikilothermen oder homoiothermen Tieren zu tun haben. Bei den poikilothermen ändert sich bekanntlich (vgl. den Artikel „Wärmehaushalt") mit der Lufttemperatur auch die Temperatur ihres Körpers und mit ihr auch die Intensität der Stoffwechselvorgänge. Bei den homoiothermen Tieren, die das Bestreben haben, ihre Körpertemperatur innerhalb gewisser Grenzen konstant zu halten, steigt der Stoffwechsel bei sinkender Außentemperatur, sobald die Wärmeverluste so groß werden, daß die Körpertemperatur zu sinken droht. Diese Stoffwechselsteigerung, von Rubner „chemische Wärmeregulation" genannt, findet hauptsächlich in den Muskeln (Muskeltätigkeit) statt. Bei kleineren Tieren lassen sich die Bewegungen der Muskeln nicht erkennen, beim Menschen aber kann man feststellen, daß die gesteigerte Wärmeproduktion mit Spannungen und regellosen Bewegungen der Muskeln einhergeht. Wenn man bei Tieren durch Curare oder durch hohe Rückenmarksdurchschneidung die Fähigkeit der Muskeln, sich zu bewegen, aufhebt, so können dieselben ihre Eigenwärme nicht mehr behalten. Wenn man beim Menschen die Bewegungen durch Uebung willkürlich unterdrückt, dann bleibt ebenfalls die Steigerung der Oxydationsprozesse aus.

Bei steigender Außentemperatur sinkt der Stoffwechsel; wenn aber die Außentemperatur abnorm hohe Werte annimmt, so daß auch die Eigentemperatur steigt, so steigen auch die Stoffwechselvorgänge entsprechend der höheren Temperatur. Was den Verbrauch an den einzelnen Nährstoffen bei der „chemischen Wärmeregulation" betrifft, so bleibt nach Rubner die Eiweißzersetzung im allgemeinen von Kälte und Wärme ganz unbeeinflußt; doch kann man unter gewissen Umständen eine Steigerung der Eiweißzersetzung durch die Kälte nachweisen. Bei dem Sinken der Temperatur wird hauptsächlich Fett verbrannt.

Ueber die sonstigen Einrichtungen für die Wärmeregulation, besonders die Erscheinung der „physikalischen Wärmeregulation" (Kleidung, Behaarung) nach Rubner vgl. den Artikel „Wärmehaushalt".

Die Veränderung des Stoffwechsels im Höhenklima durch Verminderung des Luftdrucks (Ballonfahrten und beim Aufenthalt im Hochgebirge) ist hauptsächlich charakterisiert durch eine Steigerung des Umsatzes, die in verschiedenen Höhen und in wachsendem Umfang einsetzt, die aber derartige Grade erreicht, daß sie meist nicht durch die gesteigerte Atemarbeit bedingt sein kann.

Ausführliche Untersuchungen über den Einfluß des Höhenklimas auf die Oxydationsprozesse, den Wärmehaushalt, den Eiweißstoffwechsel usw. finden sich in dem großen Werke von Zuntz, Loewy, Müller und Caspari „Höhenklima und Bergwanderungen in ihrer Wirkung auf den Menschen", Berlin 1906 und bei Durig Pflügers Archiv Bd. 133 S. 213 und 341. Neuere Forschungen haben sich auch mit dem Einfluß des Seeklimas und der Sonnenstrahlung beschäftigt. (Veröffentlichungen der Zentralstelle für Balneologie, Berlin, Ministerium des Innern), aber die Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen.

13. Beziehungen der Körpergröße zum Stoffwechsel. Bei Vergleich des Stoffwechsels zweier Individuen von verschiedener Körpergröße und verschiedenem Körpergewicht hat absolut gemessen das Individuum mit großem Körpermaße auch einen größeren Stoffwechsel als dasjenige mit kleinem Maße. Reduzieren wir aber den Stoffwechsel auf die Einheit des Körpergewichts, so hat das kleinere Individuum einen größeren Stoffwechsel als das größere. Es zeigen sich aber bei Vergleich verschiedener Individuen derselben Größe doch erhebliche Unterschiede, die zum Teil bedingt sind durch die verschiedenartige Verteilung von Eiweiß und Fett in den tätigen Organen der Individuen. Diese Ungleichheiten lassen sich, wie Rubner gezeigt hat, sofort eliminieren und man erhält ziemlich konstante Größen, wenn man den Stoffwechsel nicht auf die Gewichtseinheit, sondern auf die Oberflächeneinheit berechnet. Die Körperoberflächen sind pro Kilogramm Körpergewicht berechnet außerordentlich verschieden, z. B. beim erwachsenen Menschen 287 qcm, bei der Maus 2296 qcm. Die Körperoberfläche läßt sich nun aus dem Körpergewicht berechnen nach der Meehschen Formel: $O = K.\sqrt[3]{G^2}$, worin G in Grammen das Körpergewicht, O die Oberfläche und K eine Konstante ist, die für zahlreiche Tiere durch genaue Ausmessung der Oberfläche bestimmt ist. Berechnet man nun für verschiedene Tierarten den Stoffwechsel auf gleiche Oberflächen, so erhält man in kg/kal und für den Tag folgende Werte (Rubner Archiv für Physiologie, Suppl.-Jahrg. 1912 S. 259, 1913):

Mensch	1042 kg/cal.
Schwein	1078 „
Hund	1039 „
Kaninchen	917 „
Maus	1188 „
Maus (neugeboren)	1122 „
Meerschweinchen	1246 „

Die einzelnen Tierarten weichen also untereinander sehr wenig ab. Für dieselbe Tierart z. B. den Hund sind die Unterschiede noch geringer. Bei hungernden Hunden beobachtete Rubner folgende Werte:
984 — 1082 — 1141 — 1047 — 1191 — 1073 — 1099 kg/cal.

Rubner hat das Oberflächengesetz dadurch zu erklären versucht, daß sich „die den Körper aufbauende Zellmasse in jedem einzelnen Individuum bezüglich des Energieverbrauchs so zu ändern pflegt, daß die durch die Oberflächenentwickelung gegebene Entwärmung (Wärmeverlust) gedeckt ist“. Da der Verlust an Wärme der Oberfläche proportional sein muß — der Wärmeverlust des tierischen Organismus geschieht zu etwa $^4/_5$ durch die Haut — muß auch die Wärmeproduktion dieser Oberfläche angepaßt sein, um eine Konstanz der Körpertemperatur herbeizuführen. Da nun kleine Individuen eine relativ größere Oberfläche im Verhältnis zu ihrer Massen haben, so ist der Wärmeverlust größer und dadurch ist eine reichliche Wärmeproduktion nötig, d. h. der Stoffwechsel ist gesteigert. Gegen die Erklärung des Oberflächengesetzes durch thermische Verhältnisse allein sind von Zuntz Einwendungen gemacht, weil bei einer Temperatur von 30° C, in der wärmeregulatorische Vorgänge nicht mehr stattfinden, der Unterschied im Stoffwechsel bei Meerschweinchen von verschiedener Größe pro Körperkilo erhalten blieb und derselbe außerdem bei Kaltblütern, die keine Wärmeregulation haben, vorhanden ist. Zuntz und außerdem v. Hoeßlin glauben, daß auch die verschiedene Arbeitsleistung der Muskeln mit in Betracht zu ziehen sei.

14. Der Einfluß des Alters und des Geschlechts auf die Größe des Stoffwechsels. Der Stoffumsatz im Kindes- und Entwickelungsalter ist nicht nur pro Kilo Körpergewicht, sondern auch für die Oberflächeneinheit höher als der der Erwachsenen. Daß er für das Körperkilo größer sein muß, ergibt sich aus der Differenz der Körpergröße. Aber Untersuchungen von Sondén und Tigerstedt, Magnus-Levy und Falck, Gerhartz zeigten, daß er auch auf die Oberflächeneinheit bezogen, größer ist. Tigerstedt nimmt an, daß die Intensität der Oxydationsprozesse im jugendlichen Alter größer ist als im erwachsenen Alter.

Im Säuglingsalter ist der Stoffwechsel pro Kilo Körpergewicht höher wie beim Erwachsenen, aber pro Oberflächeneinheit ist er in der ersten Zeit geringer als bei etwas älteren Kindern, was vielleicht nach Tigerstedt auf einer noch nicht vollständigen Entwickelung des Tonus der Muskulatur beruht und weil der Säugling viel schläft.

Im Greisenalter ist der Stoffwechsel herabgesetzt, auch auf die Oberflächeneinheit bezogen und zwar kann der Unterschied bis zu 22% gegenüber dem im mittleren Lebensalter betragen.

Ein Einfluß des Geschlechts auf den Stoffumsatz läßt sich nicht mit Sicherheit feststellen, ebensowenig ein Einfluß der Menstruation und der Schwangerschaft

15. Die Ernährung des Menschen. Die große Bedeutung und Ausdehnung, welche die praktische Ernährungslehre in sozialer und volkswirtschaftlicher Beziehung gewonnen hat, gestattet es nicht, im Rahmen dieses Artikels auf Einzelheiten einzugehen. Es können hier nur die physiologischen Grundlagen einer zweckmäßigen Ernährung des Menschen auf Grund der Stoffwechseluntersuchungen und statistischer Erhebungen in aller Kürze erörtert werden. Ausführlichere Auseinandersetzungen finden sich bei König, „Chemie der Nahrungs- und Genußmittel“, Rubner „Ernährungslehre“ (Handbuch der Hygiene, Bd. I, Leipzig 1911), Leyden „Handbuch der Ernährungstherapie und Diätetik“ (Leipzig 1903), Cohnheim „Verdauung und Ernährung“ (Berlin 1908).

Man versteht nach Tigerstedt unter Nahrungsbedarf eines Menschen diejenige Quantität der verschiedenen Nährstoffe, welche dem Körper von dem Darm aus täglich zugeführt werden.

Nun nehmen wir nicht Gemische reiner Nährstoffe zu uns, sondern die Nahrungsstoffe sind in den Nahrungsmitteln enthalten, deren Zusammensetzung und Gehalt an Nährstoffen, für die Bestimmung des menschlichen Bedarfs bekannt sein muß (vgl. den Artikel „Nahrungs- und Genußmittel“). Die Nahrungsmittel werden nun nicht vollständig im Darm resorbiert, sondern ein Teil derselben verläßt im Kot unausgenützt den Körper. Die Ausnützung ist verschieden, je nachdem es sich um Eiweiß oder Fette oder Kohlehydrate, verschieden, je nachdem es sich um pflanzliche oder tierische Nahrungsmittel handelt.

Man kann nun entweder den Nahrungsbedarf des Menschen so ausdrücken, daß man die Mengen an ausnützbaren Nährstoffen Eiweiß, Fett und Kohlehydrate angibt oder daß man die Menge der Nährstoffe in Kalorien umrechnet, welche dieselben bei der physiologischen Verbrennung liefern, wobei man von den Bruttozahlen die Energie-

mengen abziehen muß, die im Harn und Kot unausgenützt den Körper verlassen. Bei gemischter Nahrung verlassen nach Rubner ca. 8% des Energiewertes unausgenützt den Körper.

Je nachdem der Mensch sich ruhig verhält oder arbeitet, ist natürlich der Nahrungsbedarf ein verschiedener. Aus einer großen Reihe von Untersuchungen hat man als Mittel für den Bedarf eines nüchternen erwachsenen Menschen bei möglichster Muskelruhe pro Kilo und Stunde 1 cal gefunden, also für einen Menschen von 70 kg in 24 Stunden etwa 1680 cal. Für einen erwachsenen Mann, der zwar keine körperliche Arbeit leistet, aber auch sich nicht absolut ruhig verhält, ergeben die Untersuchungen einen Wert von durchschnittlich 2350 cal. Für einen arbeitenden Menschen, der etwa 100000 kg Arbeit täglich leistet, ergab sich ein Wert von 3656 cal. Nun hatte Voit als Normalkostmaß für den mittleren Arbeiter eine Forderung von 118 g Eiweiß, 56 g Fett und 500 g Kohlehydrate aufgestellt. Dies entspricht einem Bruttowert von 3055 cal. Wenn es sich um Höchstleistungen des Körpers handelt, ist diese Kalorienmenge zu gering. Deshalb sind auch die Kostsätze für übermäßig stark arbeitende Menschen, für Soldaten im Kriege und bei starken Märschen bedeutend größer. Vgl. Zuntz und Schumburg „Physiologie des Marsches“ (Berlin 1901) und R. Tigerstedt „Der Nahrungsbedarf des erwachsenen Menschen in dessen Beziehung zur körperlichen Arbeit“ (Fortschritte der naturwissenschaftlichen Forschung Bd. V S. 246 1912). In diesen Fällen ist ein Kalorienbedarf von 5000 bis 6000 cal nötig. Tigerstedt hat die sämtlichen bisher vorliegenden Kostmaße der kräftig arbeitenden Menschen zusammengestellt und verglichen und kommt dabei zu dem Schluß, daß das Voitsche normale Kostmaß immer noch am ersten zu empfehlen sei. Nur müßte statt 56 g Fett 100 g Fett zu setzen sein. Selbstverständlich können die Mengen von Fett und Kohlehydraten den Vertretungswerten entsprechend variiert werden und in der Tat kommt es häufig vor, daß die Menge der Kohlehydrate in der frei gewählten Nahrung größer ist und die Fettmenge geringer und umgekehrt.

An der Forderung von 118 g Eiweiß glaubt Tigerstedt festhalten zu müssen, trotzdem die schon erwähnten Versuche von Chittenden vorliegen, bei denen die Eiweißmenge bis auf 56 g herabgesetzt war, und trotzdem die Versuchspersonen monatelang mit diesen geringen Mengen existieren konnten.

Für mäßig arbeitende Frauen, bei denen das Nahrungsbedürfnis etwa $^3/_5$ desjenigen des arbeitenden Mannes beträgt, wird als normales Kostmaß 94 g Eiweiß, 45 g Fett, 400 g Kohlehydrate = 2240 cal angegeben.

Die Aufstellung von Normalkostmaßen gewinnt erst hervorragende praktische Bedeutung, wenn es sich um Massenverpflegungen von Soldaten, Sträflingen usw. und um Aufstellung von genügenden Verpflegungssätzen handelt. Hier kommt aber außerdem auch noch der Nährgeldwert der Nahrungsmittel in Betracht.

Was nun die Zusammensetzung der Kost aus den verschiedenen Nahrungsmitteln betrifft, so stehen dem Menschen sowohl Nahrungsmittel aus dem Tierreiche, wie aus dem Pflanzenreiche zur Verfügung.

Eine rein animalische Nahrung ist für den Menschen, abgesehen von dem Säuglingsalter, nicht geeignet, sondern der Mensch gehört seiner ganzen Konstitution nach zu den Omnivoren, also zu denjenigen Lebewesen, welche auf gemischte Nahrung angewiesen sind. Nun sind in neuerer Zeit Bestrebungen im Gange, welche den Menschen auf eine rein vegetarische Lebensweise hinweisen. Vgl. Albu „Die vegetarische Diät“ und Caspari in Pflügers Archiv Bd. 10 S. 473 1905. Es sind ja in den vegetabilischen Nahrungsmitteln alle drei Nährstoffe vertreten und eine vegetarische Ernährung vermag den Menschen auch bei vollkommener körperlicher und geistiger Leistungsfähigkeit zu erhalten. Aber die vegetarische Nahrung ist unzweckmäßig. Die Nahrungsstoffe, besonders die Eiweißstoffe, werden schlecht ausgenützt, weil ein großer Teil unverdaulich ist, die Kost ist reizlos und hat ein überaus großes Volumen gegenüber der gemischten Kost.

Literatur. ***C. Voit,*** *Physiologie des allgemeinen Stoffwechsels und der Ernährung. In Hermanns Handbuch der Physiologie. Bd.* **VI,** *1.* — ***R. Tigerstedt,*** *Physiologie des Stoffwechsels. In Nagels Handbuch der Physiologie. Bd.* **I,** *S. 331, 1909.* — ***C. Oppenheimer,*** *Handbuch der Biochemie. Bd.* **IV, I** *u.* **II** *(Gaswechsel und Stoffwechsel, Energiewechsel und Stoffwechsel).* — ***M. Rubner,*** *Die Lehre vom Kraft- und Stoffwechsel und von der Ernährung. In Handbuch der Hygiene. Bd.* **I,** *S. 48, 1911.* — ***Derselbe,*** *Ernährung. In Leydens Handbuch der Ernährungstherapie. Bd.* **I,** *S. 21, 1903.* — ***A. Magnus-Levy,*** *Physiologie des Stoffwechsels. In v. Noordens Handbuch der Pathologie des Stoffwechsels. Bd.* **I,** *S. 2, 1906, II. Aufl.* — ***A. Albu und C. Neuberg,*** *Physiologie und Pathologie des Mineralstoffwechsels. Berlin 1906.*

R. Schöndorff.

Stoffwechsel der Pflanzen.

1. Wesen und Bedeutung des Stoffwechsels. 2. Stoffaufnahme durch die Pflanze. 3. Aggregatzustand der aufzunehmenden Nährstoffe. 4. Orte der Nahrungsaufnahme am Pflanzenkörper. 5. Chemische Zusammensetzung der Pflanzen. 6. Uebersicht über die unerläßlichen Grundstoffe. 7. Aufnahme des Kaliums. 8. Aufnahme des Magnesiums. 9. Aufnahme des Calciums. 10. Aufnahme des Eisens. 11. Aufnahme der entbehrlichen mineralischen Basen. 12. Aufnahme des Schwefels. 13. Aufnahme des Phosphors. 14. Aufnahme des Siliciums, Chlors, Jods. 15. Stickstoffaufnahme durch die Pflanze. 16. Grundzüge des Eiweißstoffwechsels; stickstoffhaltige Endprodukte. 17. Kohlenstoffaufnahme (mit Ausnahme der Kohlensäure). 18. Umsatz stickstofffreier Kohlenstoffverbindungen. 19. Technik von Ernährungsversuchen.

1. Wesen und Bedeutung des Stoffwechsels. Die Lehre vom pflanzlichen Stoffwechsel umfaßt alle Stoffumwandlungen, welche von der Pflanze unterhalten werden und auf welchen ihre gesamte Lebensstätigkeit beruht. Mit W. Pfeffer pflegt der Pflanzenphysiologe den Stoffwechsel zu gliedern in zwei Unterdisziplinen, den Bau- und den Betriebsstoffwechsel.

Die Lehre vom Baustoffwechsel hat zu zeigen, welche Umwandlungen die der Außenwelt entstammenden Nährstoffe vom Augenblick ihres Eintritts in die lebenden Zellen, in manchen Fällen auch bereits vorher infolge der Einwirkung von Ausscheidungsprodukten der Zellen, durchlaufen, bis sie schließlich zu den mannigfachen Bausteinen der Zellen umgestaltet oder als Reservestoffe vorläufig abgelagert werden, oder endlich zu Abfallstoffen werden, die ihrerseits entweder im Innern des Organismus niedergelegt oder auch wieder der Außenwelt zurückgegeben werden. Hierbei hat die Lehre vom Baustoffwechsel die Unterschiede nachzuweisen, welche die Pflanzen verschiedener Organisation bei ihrer aufbauenden Tätigkeit zeigen, sodann darauf zu achten, daß auch bei einer und derselben Pflanze der Aufbau, wie alle anderen Lebensvorgänge je nach den jeweils herrschenden äußeren wie inneren Bedingungen, je nach Temperatur, Durchstrahlung, chemischer Zusammensetzung der Umgebung und davon abhängiger Zusammensetzung des Pflanzenkörpers und seiner Teile in ganz verschiedenen Bahnen verlaufen oder doch mindestens in seiner Schnelligkeit verändert, bald gebremst, bald lebhaft angespornt werden kann. Die Fähigkeit zu solchen Abänderungen ist für die Erhaltung des Individuums und der Species geradezu unerläßlich, in vielen Fällen zum mindesten von großer Bedeutung; die Befähigung zur „Selbststeuerung“ also, die sich uns bei der Betrachtung jedweder Lebensäußerung aufdrängt, zeigt sich dem Forscher auch beim Studium des Baustoffwechsels.

Das wichtigste Hilfsmittel zur Ergründung des Baustoffwechsels ist naturgemäß die chemische Analyse der unter verschiedenen Bedingungen erwachsenen, in verschiedenen Entwickelungsstadien befindlichen Pflanzen und ihrer Organe. Vielfach muß der Forscher dabei die Frage, warum ihm bei derartigen Untersuchungen bestimmte Stoffe als „Bausteine“ entgegentreten, unbeantwortet lassen, in anderen Fällen vermag er zu erkennen, warum sie sich zu bestimmten Funktionen besser eignen als andere; insonderheit die ganz allgemein gehaltene Frage warum am Aufbau der Pflanzen die Kohlenstoffverbindungen einen so wesentlichen Anteil haben, kann dahin beantwortet werden, daß das Element Kohlenstoff, wie kein zweites es in so weitgehendem Maße tut, sich an der Zusammensetzung der allerverschiedensten Stoffe beteiligt, Stoffe, die eben wegen dieser ihrer Mannigfaltigkeit den verschiedensten Ansprüchen genügen können; außerdem auch, und das ist besonders wichtig, vielfach ohne Schwierigkeiten ineinander überführt werden können, so daß die Pflanze aus verhältnismäßig wenigen und vergleichsweise einfach gebauten Kohlenstoffverbindungen, welche die Außenwelt ihr zur Verfügung stellt, oder die sie als Reservestoffe thesauriert hat, unter gleichzeitiger Verwertung bestimmter Mineralstoffe die komplizierten Bausteine ihrer Zellen schaffen und zusammenfügen kann.

Aber auch anderweitige Eigenschaften vieler Kohlenstoffverbindungen, die als Bausteine der lebenden Substanz oder ihrer Organe funktionieren, sind leicht mit den Ansprüchen, welche die Lebenstätigkeit an sie stellt, in Einklang zu bringen. Die kolloidale Beschaffenheit, ausgezeichnet durch die Fähigkeit zu schnellen Zustandsänderungen, durch die große innere Oberfläche und darauf beruhende Adsorptionsfähigkeit usw. machen Eiweiß und andere Protoplasmabestandteile offenbar besonders dazu geeignet, die Lebenserscheinungen an sich zu ketten; dabei kann man allerdings nicht übersehen, daß derartige allgemeine Redewendungen sich sehr an der Oberfläche halten müssen, wofür als Entschuldigung die geringe Kenntnis vom Wesen dessen, was das Lebende charakterisiert, dienen darf. Die schnelle Ueberführbarkeit kolloidaler in kristalloide Stoffe, wodurch Diffusions- und Wanderfähigkeit, ferner osmotische Leistungsfähigkeit erhöht werden, sind sodann von allbekannter Bedeutung für die Stoffwechselvorgänge, die Ueberführung von Eiweiß in Aminosäuren oder von Stärke in Zucker sind wichtige Bei-

spiele dafür. Die Quellbarkeit und Dehnbarkeit der Zellulose, die Starrheit und Wasserdurchlässigkeit der Holzmembranen, die mangelhafte Durchlässigkeit der verkorkten Membranen für Wasserdampf sind Eigenschaften, die es durchaus verständlich machen, daß die Pflanzen ihre Gerüste aus derartigen organischen Stoffen aufbaut, die allerdings vielfach noch durch mineralische Einlagerungen gefestigt werden.

Noch mehr leuchtet die Eignung von Kohlenstoffverbindungen für die Zwecke des Stoffwechsels ein, wenn wir uns jetzt einer kurzen Betrachtung des Betriebsstoffwechsels zuwenden.

Im Betriebsstoffwechsel werden Stoffe, die die Pflanze im Baustoffwechsel gebildet oder die sie als solche von außen aufgenommen hat, abgebaut und so die Energie beschafft, die nötig ist zur Unterhaltung der Lebenstätigkeit.

Als Betriebsstoffe kommen nun begreiflicherweise nur Stoffe mit freier, zur Arbeitsleistung befähigter Energie in Betracht und unter solchen in erster Linie verbrennliche Kohlenstoffverbindungen; nur in einigen bemerkenswerten Ausnahmefällen, die gleich noch zu erörtern sind, spielen auch anorganische Stoffe die Rolle der Energielieferanten. — Im übrigen handelt es sich, wie allbekannt bei den Betriebskraft liefernden Vorgängen entweder um sogenannte oxybiontische Prozesse, d. h. Oxydationen, die unter dem Eingriff des freien Sauerstoffs verlaufen, oder aber um anoxybiontische Vorgänge. Bei den letzteren handelt es sich in den meisten Fällen darum, daß sauerstoffhaltige Kohlenstoffverbindungen unter Bildung eines gänzlich oxydierten Produkts, der Kohlensäure, die neben reduzierten Produkten entstehen, im Stoffwechsel zerlegt werden, man kann also auch sagen, daß bei der Anoxybiose Verbrennungen mit Hilfe gebundenen Sauerstoffs ausgeführt werden. Das bekannteste Beispiel ist die alkoholische Gärung (vgl. die Artikel „Gärung. Alkoholische Gärung“); im übrigen ist auf den Artikel „Atmung“, sowie auf „Bakterien. Physiologie“ zu verweisen. Die eigenartigen Fälle von Desulfuration und Denitrifikation, bei welchen der zur Verbrennung von Kohlenstoffverbindungen dienende Sauerstoff total oxydierten anorganischen Verbindungen unter Energieaufwand entnommen wird, ist ebenfalls im Artikel „Bakterien. Physiologie“ gestreift.

Die Betriebsstoffe können nun für die Pflanze auch in anderer Hinsicht im Stoffwechsel von Bedeutung sein, sie können wie z. B. Zucker zeitweise, ehe sie im Betriebsstoffwechsel verbraucht werden, als Turgorstoffe dienen, also durch ihre physikalischen Eigenschaften wertvolle Dienste leisten. Was ihre chemische Qualität anlangt, so werden wir gleich noch hören, daß vielfach dieselben Stoffe, z. B. wiederum Zucker, je nach Bedarf teilweise als Baustoffe, teilweise als Betriebsstoffe dienen können; auch sonst kommt ihre chemische Qualität in Frage, insofern sie z. B. keine schädigenden Eigenschaften haben dürfen, das wesentliche ist aber das Ausmaß ihrer freien Energie. Man kann mit Rubner von „Isodynamie der Betriebsstoffe“ reden, um damit anzudeuten, daß solche Stoffe, unabhängig von ihrer chemischen Konstitution der Pflanze die gleiche Energiemenge zur Verfügung stellen, wenn sie denselben chemischen Energieinhalt haben, und bis zu denselben Produkten abgebaut werden, gleichgültig auf welchem Weg der Abbau erfolgt. Tatsache ist denn auch, daß die Regulationsfähigkeit (Selbststeuerung) den pflanzlichen Betriebsstoffwechsel ebensogut wie den Baustoffwechsel beherrscht, daß der eine Betriebsstoff für den anderen einspringen kann. Werden für gewöhnlich Kohlehydrate zum Betrieb verwendet, so können doch bei ihrem Mangel Eiweißstoffe dem gleichen Zweck dienen. So wurde erst neuerdings von Déléano [3] nachgewiesen, daß im Betriebsstoffwechsel der Blätter zuerst Kohlehydrate und wenn diese zu mangeln beginnen, Eiweißkörper abgebaut werden, und analoge Beispiele können noch in großer Menge beigebracht werden. Immerhin darf man das Wort Isodynamie nicht falsch verstehen; denn es ist zum mindesten unbekannt, ob der Organismus die Energie, die frei wird, wenn er zwei verschiedene Stoffe von gleichem Energieinhalt zu denselben Endprodukten abbaut, in beiden Fällen für seinen Lebensbetrieb gleich vollständig ausnutzt.

Sodann ist zu beachten, daß ein und derselbe Stoff je nachdem ihn ein Organismus mehr oder minder weit abbauen kann, mehr oder weniger Betriebsenergie zu liefern vermag. Stellen wir uns vor, daß zwei Pilze, von denen der eine gegenüber freiem Ammoniak sehr empfindlich ist, der andere aber nicht, Eiweiß im Betriebsstoffwechsel unter Ammoniakabspaltung abbauen, so wird nur der letztere den stickstofffreien Rest total bis zur Kohlensäure oxydieren können, der erstere aber nur bis zu Oxalsäure, um mittels dieser das Ammoniak unschädlich zu machen und so auf den Energieinhalt, der in der Oxalsäure steckt, verzichten müssen; es handelt sich da um eine der Entgiftungsreaktionen, die im Stoffwechsel nicht nur von Pflanzen sondern auch von Tieren eine so große Rolle spielen, im tierischen Stoffwechsel ist wohl einer der bekanntesten Fälle die Neutralisierung des Glykokolls durch Benzoesäure.

Fragen wir nun, welcherlei Arbeit durch den Betriebsstoffwechsel der lebenden Pflanze geleistet wird. Zunächst Arbeit im engeren physikalischen Sinn, z. B. die Hebung des Pflanzengewichts während des Wachstums, wobei also die Energie, die der Betrieb liefert, in Form von Energie der Lage gespeichert wird; ferner Arbeit beim Ueberwinden von Widerständen während des Wachstums, z. B. beim Sprengen von Felsen durch Wurzeln Sodann wird Arbeit geleistet beim Zustandekommen der Protoplasmaströmungen, Chromatophorenumlagerungen und ähnlicher Vorgänge, sodann bei Stoffwanderungen, die entgegen dem Diffusionsgefälle erfolgen, also nicht von selbst, sondern nur unter Arbeitsaufwendung realisiert werden können, wie der Speicherung von Salpeter im Zellsaft von Meerespflanzen (Nathansohn). Schließlich die Arbeit, die beim chemischen Aufbau geleistet wird, indem Stoffe auf höheres chemisches Niveau gehoben werden, wobei die Energie, die dabei aufgebracht wird, in Form potentieller chemischer Energie gespeichert wird. Während in diesem letztgenannten Fall die Energie also zunächst nicht wieder frei wird, unter Umständen sogar erst nach dem Tod der betreffenden Pflanze, während ferner in dem erstgenannten Fall, Hebung eines Gewichts gegen die Schwere, die Energie als Energie der Lage gestapelt wird, wird sie in den anderen genannten Fällen als Wärme nach geleisteter Arbeit alsbald wieder frei und strahlt nach außen.

Ein wie großer Teil der gesamten Wärme, welche den Körper verläßt, vorher Arbeit geleistet hat, das wissen wir nicht, denn die Pflanze unterhält auch Prozesse, die exothermisch sind, d. h. Wärme produzieren, ohne daß es ihr dabei notwendig auf diese Energie ankommt. Manche abbauende wärmeliefernde Prozesse mögen nur im Dienst des Baustoffwechsels stehen, d. h. nicht zur Betriebslieferung, sondern zur Lieferung von Bausteinen dienen.

Von derjenigen Energie, welche bei leuchtenden Pflanzen in Form von Lichtstrahlen die Pflanze verläßt, ist es strittig, ob sie vorher Arbeit geleistet hat, oder nicht; auch ist zweifelhaft, ob sie für die leuchtenden Organismen überhaupt von irgendeiner Bedeutung ist. — Bei manchen Gärungsvorgängen mag es weniger auf die Beschaffenheit von Betriebsenergie ankommen, als darauf, daß die Gärprodukte dem Erzeuger im Kampf ums Dasein nützen und Feinde schädigen; sie dienen zwar dem Lebensbetrieb, aber nicht in dem Sinn, daß sie Betriebsenergie liefern.

Die im Pflanzenkörper durch den Betriebsstoffwechsel gebildete Wärme reicht bekanntlich nur in wenigen Fällen dazu aus, um der Pflanze eine Temperatur zu verleihen, die sich wesentlich über die der Umgebung erhebt, oft wird umgekehrt durch die Wasserverdunstung transpirierender Pflanzen diesen mehr Wärme entzogen, als durch die Atmung erzeugt wird: eine Untertemperierung der Pflanze ist die Folge. Eine Abkühlung unter die Temperatur der Umgebung findet auch dann statt, wenn turgeszente Zellen sich unter Arbeitsleistung ausdehnen (Pfeffer); eine Ausnutzung des so gebildeten Temperaturgefälles zwischen Pflanzenkörper und Umgebung zur Arbeitsleistung findet nicht statt. In den mehr vereinzelten Fällen, in welchen sich die Pflanze beträchtlich stärker als ihre Umgebung erwärmt, ist dies Folge einer besonders lebhaften Atmung, oder aber Folge davon, daß die Vegetation im Innern eines schlechten Wärmeleiters stattfindet; auch können beide Umstände zusammenwirken. Die sich stark erwärmenden Blütenkolben der Araceen, die Erwärmung gärender Massen oder feuchter von Bakterien und Pilzen durchwucherter Heuhaufen, die bekanntlich auffallend heiß werden können und einer thermophilen Flora günstige Lebensbedingungen schaffen können, sind Beispiele dafür.

Wenn in solchen Fällen die starke Temperaturerhöhung nicht lediglich Folge eines intensiven zur Arbeitsleistung verwendeten Betriebsstoffwechsels ist, wenn vielmehr solche exothermische Prozesse nur darauf abzielen, Wärme zu liefern, diese also nicht erst nach getaner Arbeit in die Erscheinung tritt, kann man von einem besonderen Wärmestoffwechsel reden. Die Erhöhung der Temperatur kann dann als sogenannte tonische Bedingung die Bedeutung haben, den Stoffwechsel in einer für die Pflanze günstigen Weise zu beeinflussen, oder auch, das gilt insbesondere für thermophile Mikroben, insofern günstig sein, als sie Organismen mit anderen Temperaturansprüchen verdrängt.

In den allermeisten Fällen aber ist ein besonderer Wärmestoffwechsel bei den Pflanzen nicht nachweisbar, wie denn ja auch die Annahme eines solchen im tierischen Stoffwechsel unnötig zu sein scheint (vgl. Oppenheimer).

Haben wir oben gesagt, daß wir nicht wissen, ein wie großer Teil der von der Pflanze nach außen gestrahlten Wärme vorher Arbeit geleistet hat, so gilt des weiteren, daß wir überhaupt nicht wissen, wie eigentlich die potentielle chemische Energie, die in den Betriebsstoffen steckt, zur Arbeitsleistung ausgenutzt wird, in welche Energieformen sie vorher transformiert wird, ehe sie Arbeit leistet; diese Frage ist bekanntlich auch im tierischen Stoffwechsel noch ungelöst. Nur soviel ist sicher, das kann z. B.

aus den Ausführungen Nathansohns ersehen werden, daß die lebende Substanz irgendwelche Strukturen, maschinelle Einrichtungen haben muß, damit diese Transformation in der erforderlichen Weise durch sie bewirkt werde, die Energie also nicht ungenutzt als Wärme verpufft. Welcher Art diese Struktur sein mag, ist uns freilich noch gänzlich unbekannt. Auf die Auseinandersetzungen Nathansohns, der mit der Möglichkeit rechnet, daß die bei der Atmung frei werdende Energie in elektrische Ströme umgewandelt wird, die in der Pflanze kreisen, ehe sie Arbeit leisten, kann hier nur verwiesen werden. Solche Annahme hätte nach dem genannten Forscher den Vorzug, daß sie es ohne wesentliche Schwierigkeiten begreiflich machte, wie die chemische Energie zu synthetischen Prozessen oder zu mechanischen Arbeitsleistungen verwertet wird und daß sie auch die Ueberführung der Energie vom Ort der Produktion zum Ort des Bedarfs verständlich machen würde, eine Ueberführung, mit deren Notwendigkeit z. B. auch alle Theorien rechnen, die sich bestreben, die Energietransformation im tierischen Körper dem Verständnis näher zu bringen.

Werfen wir im Anschluß an das Gesagte noch einen kurzen, vergleichenden Blick auf die Einteilung des Stoffwechsels, die bei Tierphysiologen üblich ist, so finden wir ähnliche Unterdisziplinen, was ja auch bei der prinzipiellen Uebereinstimmung im Stoffwechsel aller Lebewesen nicht wundernimmt. Der vielfach übliche Ausdruck Arbeitsstoffwechsel deckt sich durchaus mit der Pfefferschen Bezeichnung Betriebsstoffwechsel; immerhin fällt auf, daß in der tierischen Physiologie die Bezeichnung Baustoffwechsel (Zuwachsstoffwechsel) zurücktritt hinter der Bezeichnung Erhaltungsstoffwechsel. Was bedeutet diese? Betrachten wir die höheren Tiere als Versuchsobjekte des Tierphysiologen, so finden wir, daß es sich im allgemeinen um Organismen handelt, die nachdem sie vollkommen ausgewachsen sind, noch längere Zeit fortleben ohne neue Organe zu bilden und ohne also ein weiteres mit Körpervergrößerung verbundenes Wachstum zu zeigen, während die Pflanzen im Gegensatz dazu eine ebenso scharfe Grenze zwischen wachsendem und ausgewachsenem Zustand nicht zeigen. Lassen doch selbst „ausgewachsene“ Bäume stets noch das Austreiben von Knospen usw. erkennen. Folge dieser Tatsache ist es, daß die Tierphysiologen im allgemeinen häufiger als die Pflanzenphysiologen mit „ausgewachsenen“ Objekten arbeiten und einen Stoffwechsel untersuchen, bei welchem von Zuwachs nichts mehr zu erkennen ist, während für den Pflanzenphysiologen keineswegs immer aber doch recht häufig der Stoffwechselversuch den Charakter des Ernährungsversuchs trägt, während dessen lebhafter Baustoffwechsel, also Zuwachs stattfindet. Schon aus diesem Grunde tritt ersterem die Tatsache meistens deutlicher vor Augen als letzterem, daß auch ausgewachsene Objekte sich dauernd abnutzen und des Stoffersatzes, des Erhaltungsstoffwechsels also erheischen, ohne daß sich das der äußeren Betrachtung aufdrängt.

Außerdem aber ist auch bei Tieren die Abnutzung stärker als bei den ökonomischer arbeitenden Pflanzen. Denn sehen wir vom tierischen Kot ganz ab, da ja der Stoffwechsel erst „hinter der Darmwand“ beginnt, so geht doch mit dem Harn jederzeit Stickstoff verloren, der stets wieder ersetzt und in Form geeigneter Nährstoffe neu geboten werden muß, was bei Pflanzen bekanntlich nicht der Fall ist; so spielt tatsächlich für Tiere der „Erhaltungsstoffwechsel“ eine größere Rolle als für Pflanzen. Das wußte schon Boussingault der das Asparagin der Pflanzen mit dem Harnstoff der Tiere homologisierte, und annahm, daß der Unterschied zwischen Tier und Pflanze nur darin bestehe, daß die Tiere weniger ökonomisch arbeiten wie die Pflanzen, welch letztere die Zerfallsprodukte ihrer Eiweißkörper nicht sezernieren, sondern wieder zum Aufbau verwerten. — Doch wir müssen hier noch etwas tiefer eindringen: Seit Pflüger wird vielfach die Anschauung verfochten, daß bei den Tieren mit der Lebenstätigkeit dauernd ein Zerfall von Eiweiß und zwar von „lebender Substanz“ verbunden sei, hierher rühre der im Harn erscheinende Stickstoff und dieser Verlust an lebender Substanz sei es, der stets durch Eiweißzufuhr wieder ausgeglichen und ersetzt werden müsse. Sollte dem so sein, so müßte man angesichts der weitgehenden Uebereinstimmung zwischen Lebenserscheinungen bei Pflanzen und Tieren offenbar annehmen, daß auch bei jenen, solange sie leben, ein steter Eiweißzerfall der lebenden Substanz stattfinde.

Andere Forscher aber deuten den Sachverhalt anders und sind der Meinung, daß weder bei Tieren noch bei Pflanzen ein dauernder Abbau und Wiederaufbau der lebenden Substanz stattfinde. Sie sagen, die Tiere haben sich angesichts ihres Bedürfnisses nach kompendiöser Nahrung so an den Konsum von Eiweißkörpern angepaßt, daß sie der Eiweißzufuhr nicht mehr entraten könnten; jener bei ihnen stets nachweisbare Eiweißabbau sei gar kein „Zerfall der lebenden Substanz“, sondern dem Abbau von Kohlehydraten, Fetten und anderen Betriebsstoffen direkt an die Seite zu stellen, und die Pflanzen sollen sich darin von den Tieren unterscheiden, daß sie eben auch ohne Eiweißzufuhr auskommen (mit Ausnahme be-

stimmter zum parasitischen Lebenswandel herabgesunkenen Formen) und darum keineswegs wie jene dauernd Eiweißstoffe abzubauen brauchten. — Die Entscheidung der Frage, ob das Leben mit einem dauernden Aufbau und Zerfall der lebenden Substanz verknüpft ist, wäre ungeheuer wichtig, ist aber vorläufig unmöglich, weil wir bis heute kein Mittel haben sicher zu entscheiden, was in der Zelle eigentlich lebt und was tote Reservestoffe sind. Die ansprechende Hypothese, daß in den Pflanzenzellen das lebende Gerüst wesentlich aus Nukleoproteiden vereint mit anderen allverbreiteten Stoffen, wie Lecithinen, Cholesterin usw. bestehe, ist eben nur eine Hypothese, als Arbeitshypothese allerdings wertvoll.

Wenden wir uns nun nach diesem vergleichenden Ausblick wieder den Pflanzen zu, um zu fragen, woher diese und zwar zuerst die grünen Pflanzen und die braunen, roten und blaugrünen Algen, welche bekanntlich den allermeisten anderen pflanzlichen oder tierischen Wesen chemische Stoffe und Energie für Bau und Betrieb verschaffen, ihrerseits ihre Energie beziehen, so lautet die allbekannte Antwort: von der Sonne. Sie „begeben" sich in das Energiegefälle, welches von der Sonne zur Erde herabstrahlt, und benutzen einen kleinen Bruchteil dieser Energie, um sich Baustoffe und Betriebskraft zu verschaffen. Dabei verwenden sie zur Arbeitsleistung die strahlende Energie nicht direkt, wie etwa ein Radiometer (Nathansohn), sondern derart, daß sie diese in ihren chlorophyllhaltigen Zellen transformieren in potentielle chemische Energie, indem sie in dem Prozeß der „Kohlensäuearssimilation" die Kohlensäure reduzieren und zum Aufbau von Kohlehydraten, allgemeiner gesagt von organischen Stoffen mit freier Energie verwenden, die sie in ihrem Zellinnern stapeln („thesaurieren").

Diese indirekte Verwertung strahlender und Speicherung chemischer Energie, die ja auch alle anderen Lebewesen charakterisiert, hat, wiewohl zuerst Ostwald betont hat, den Vorteil, daß auf solche Weise die Energie in sehr kompendiöser Form gespeichert wird, in einer Form sodann, in welcher sie jederzeit leicht aktiviert und zur Arbeitsleistung verwandt werden kann, sobald nur die äußeren Umstände es überhaupt ermöglichen. Auf diese Weise sind also die Pflanzen, mögen sie noch so sehr die Sklaven von Wind und Wetter sein, doch von der jeweiligen Witterung bis zu einem gewissen Grad emanzipiert und es kann auch solchen Organen, die niemals direkt von der Sonne bestrahlt werden, Energie zugeführt werden durch Stoffwanderungen im Pflanzenkörper.

Die auf solche Weise entstandenen Kohlenstoffverbindungen nun dienen einmal gemeinsam mit den aus dem Boden mittels der Wurzeln aufgenommenen Nährsalzen zum Aufbau des Körpers, sodann aber auch, indem sie veratmet werden als energieliefernde Stoffe. Da also dieselben Stoffe in der Pflanze sowohl dem Bau wie dem Betrieb dienen, können beide Tätigkeiten nicht scharf, oft nur begrifflich voneinander getrennt werden. Es hängt von spezifischen Fähigkeiten, sodann auch von der jeweiligen Lebenslage ab, wieviel von den Reduktionsprodukten der Kohlensäure dem Aufbau dient, wieviel veratmet wird. Der „ökonomische Koeffizient" wie Pfeffer sagt, ist eine sehr wechselnde Größe. Man könnte die eben kurz skizzierte Kohlensäureassimilation sowohl dem Baustoffwechsel zurechnen, weil sie Stoffe aufbaut, als auch dem Betriebsstoffwechsel, weil sie dessen materielle Grundlage schafft.

Annähernd gleichbedeutend mit Bau- und Betriebsstoffwechsel sind die ebenfalls sehr häufig gebrauchten Bezeichnungen Assimilation und Dissimilation. Verwendet man diese, so hat man die Reduktion der Kohlensäure im Licht der Assimilation zuzuzählen.

Der Aufbau organischer Stoffe aus Kohlensäure in grünen Pflanzen mit Hilfe der Energie des Sonnenlichtes ist eine Reduktionssynthese, die man kurz auch als Photosynthese zu bezeichnen pflegt (Pfeffer). Als Chemosynthese wird hingegen bezeichnet die Assimilation der Kohlensäure durch bestimmte Bakterien, welche hierzu nicht die Energie des Sonnenlichtes verwerten, sondern die Energie, die in gewissen oxydabeln anorganischen Stoffen darin steckt, Stoffen, die sie in ihre Zellen aufnehmen und deren Oxydation sie katalytisch beschleunigen. Wie man an anderen Stellen dieses Handbuchs nachlesen kann, gehören hierher die Wasserstoff-, Schwefel-, Nitrifikations- und bestimmte Eisenbakterien, neuerdings ist es auch für die durch Winogradskys Untersuchungen bekannt gewordenen klassischen Schwefelbakterien Thiothrix und Beggiatoa durch Keil erwiesen, daß sie Kohlensäure assimilieren können. Während also bei allen diesen Formen die freie, im Wasserstoff, Ammoniak, der salpetrigen Säure, dem Schwefelwasserstoff, Eisenoxydul steckende freie Energie dieselbe Rolle spielt, wie die der Sonne in grünen Pflanzen, ist es noch zweifelhaft, ob die Kohlensäure assimilierenden Bakterien außerdem noch andere Spaltungen oder Verbrennungen und zwar von organischen Stoffen unterhalten müssen, Stoffen, die sie aus Kohlensäure aufgebaut haben. Falls letzteres zutrifft, so würden sich unsere Bakterien von grünen Pflanzen im wesentlichen nur durch Benutzung einer anderen Energie-

quelle zur Reduktion der Kohlensäure auszeichnen; falls sie aber nicht auf Verbrennung organischer Stoffe angewiesen sein sollten, so wäre bei ihnen Bau- und Betriebsstoffwechsel klarer geschieden, als bei grünen Pflanzen, insofern die von ihnen aus Kohlensäure gebildeten organischen Stoffe lediglich dem Bau ihrer Zellen dienten, die genannten Mineralstoffe aber den gesamten Betrieb deckten. Der sichere Nachweis der letzteren Alternative wäre auch darum von großer Bedeutung, weil dann für diesen Fall sicher nachgewiesen wäre, daß Leben ohne Zerstörung organischer Stoffe, also auch ohne Eiweißzerfall tatsächlich möglich ist. Hier muß es genügen, noch darauf hinzuweisen, daß von den genannten Bakterienformen die Wasserstoffbakterien auch mit Hilfe organischer Stoffe ernährt werden können, während solche Versuche bei Schwefel- und Nitrifikationsbakterien scheitern, immerhin können letztere, falls ihnen als Hauptnährstoff Kohlensäure geboten wird, außerdem Zucker im Stoffwechsel abbauen, so daß dieser nach Ansicht einiger Forscher hier eine Art von Ersatzenergiequelle vorstellt.

Daß bei bestimmten der hierher gehörigen Bakterien, ebenso wie bei grünen Pflanzen eine Speicherung von Betriebsmaterial vorkommt, lehren die Beggiatoen und Verwandten, die Schwefel in Tröpfchenform in ihren Zellen stapeln. Ueber etwaige Speicherung organischer Stoffe ist aber bei ihnen nichts bekannt.

Die chlorophyllhaltigen Pflanzen und die eben genannten Bakterien, die Kohlensäure als Nährstoff benutzen, und auch sonst nur mineralische Nahrung aufnehmen, bezeichnet man als autotrophe Pflanzen. Autotroph, d. h. von anderen Lebewesen unabhängig, sind nun die grünen Pflanzen rücksichtlich ihrer Energiequelle tatsächlich, insofern als ihnen diese nicht von anderen Wesen geliefert wird, die autotrophen Bakterien aber nur bis zu einem gewissen Grade, nämlich nur insoweit, als ihre Energiequellen, Ammoniak, salpetrige Säure, Schwefelwasserstoff usw. nicht dem Stoffwechsel anderer Wesen sondern der leblosen Natur entstammt und das ist nur teilweise der Fall; ein großer Teil, in vielen Fällen wohl auch die Gesamtheit der ihnen Energie liefernden Stoffe entstammt dem Stoffwechsel anderer Bakterien, mit denen sie die Standorte teilen. Was die Kohlensäure angeht, also den Baustoff der Autotrophen, so sind sämtliche autotrophe Formen auf die Stoffwechseltätigkeit anderer Wesen, durch deren Atmung eine Verarmung der Atmosphäre an Kohlensäure verhindert wird, angewiesen.

Im Gegensatz zu den autotrophen treten die heterotrophen Pflanzen, welche organische Stoffe aufnehmen müssen um wachsen und gedeihen zu können. Hierher gehören die saprophytischen und parasitischen Pilze und die übergroße Mehrzahl der Bakterien, ferner von den höheren Pflanzen diejenigen Saprophyten und Parasiten, die des Chlorophyllbesitzes ermangeln. Ein wesentlicher Unterschied im Stoffwechsel der Auto- und Heterotrophen ist eigentlich nicht vorhanden, da die Verwertung der Stoffe, die erstere durch Assimilation der Kohlensäure schaffen und die letztere in organischer Form von außen aufnehmen, ganz dieselbe ist, sie dienen teils als Bau-, teils als Betriebsstoffe; auch bei den Heterotrophen kann also Bau und Betrieb nicht scharf geschieden werden, und auch für den Stoffwechsel der Heterotrophen gilt, daß der „ökonomische Koeffizient" stark variabel ist, ja dieser Koeffizient ist mit Vorliebe im heterotrophen Stoffwechsel untersucht worden in seiner Abhängigkeit von äußeren und spezifischen Einflüssen, da Heterotrophe oft leichter und bequemer zu kultivieren sind und außerdem die Nahrungszufuhr bequem dosiert werden kann, während die Menge der bei der Kohlensäureassimilation der Autotrophen entstehenden Stoffe oft nur schwer zu ermitteln und diese ihrer Qualität nach nicht stets genügend bekannt sind. — Daß ein wesentlicher Unterschied im Stoffwechsel der Auto- und Heterotrophen fehlt lehrt ferner die Tatsache, daß bestimmte Organe, etwa die Wurzeln der Autotrophen hetero- troph leben, daß es ferner gelingt die Autotrophen durch künstliche Zufuhr organischer Stoffe im Dunkeln zu heterotrophem Leben zu zwingen (vgl. den Artikel „Photosynthese").

Zwischen den autotrophen und heterotrophen Pflanzen stehen die mixotrophen, die von Kohlensäure leben, nebenher aber an ihren natürlichen Standorten auch organische Stoffe aufnehmen. Hierher gehören manche chlorophyllhaltige Parasiten unter den höheren Pflanzen, z. B. die Rhinantoideen, ferner die Insektivoren, die samt und sonders organische Stoffe nur als Zukost verwerten, auch viele Algen, Flagellaten usw., die schmutziges Wasser usw. bewohnen (näheres in den Artikeln „Saprophyten" und „Insektivoren"). Zu erwähnen ist noch, daß es bei Hetero- und Mixotrophie nicht immer allein auf Zufuhr des Kohlenstoffs in organischer Bindung ankommt, daß vielfach auch Phosphor und andere Elemente die gemeiniglich in Form von Mineralsalzen aufgenommen werden, in organischer Bindung in den Stoffwechsel gerissen werden (näheres später). Daß die Frage, ob der Stickstoff aus anorganischen Salzen oder in Form organischer Verbindungen assimiliert, wird, ob m. a. W. Stick-

stoffautotrophie oder Stickstoffheterotrophie vorliegt, eine sehr große Rolle in der pflanzlichen Ernährungslehre spielt, wird nachher noch betont werden.

Welche Bindungsform der verschiedenen chemischen Elemente im übrigen für die Aufnahme in den Stoffwechsel der verschiedenen Pflanzen die geeignetste ist soll weiter unten bei Besprechung dieser Elemente erwähnt werden. Hier sei nur noch erwähnt, daß man von Prototrophie dann spricht, wenn ein Element als solches dem Stoffwechsel verfällt, also nicht in organischer oder mineralischer Bindung.

Blättern wir nun in diesem Handbuch, so zeigt es sich, daß viele der wesentlichsten Teile des pflanzlichen Stoffwechsels schon an anderer Stelle behandelt sind. Das gilt zunächst vom gesamten Betriebsstoffwechsel, der in den Artikeln „Atmung“ und „Gärung“ dargestellt ist, und dessen chemisches Rüstzeug, die Enzyme, ebenfalls in einem besonderen Artikel behandelt werden. Aber auch die wichtigsten Teile des Baustoffwechsels, die Umwandlung der Kohlensäure in organische Stoffe in grünen und anderen autotrophen Pflanzen, findet sich unter „Photosynthese“ und in den von Bakterienphysiologie handelnden Artikeln dargestellt, desgleichen in den letztgenannten die Stickstoffprototrophie seitens der Bakterien. So erübrigt es sich für uns, was den Stoffwechsel im engeren Sinn angeht, noch einige Worte über den Mineralstoffwechsel, über den Eiweißstoffwechsel u. a. ergänzend hinzuzufügen.

Nun haben uns aber unsere obigen Ausführungen schon gezeigt, daß die Lehre vom Stoffwechsel im engeren Sinn nicht abstrahieren kann von der Stoffaufnahme durch die Pflanzen, haben wir doch gesehen, daß man auf Grund des Nährstoffbedarfs die Pflanzen in verschiedene große Gruppen einteilen kann. Dieser Stoffaufnahme werden wir uns auf den folgenden Zeilen also ebenfalls zu widmen haben.

2. Stoffaufnahme durch die Pflanze. Die Behandlung der Stoffaufnahme durch die Pflanzen, d. h. der einleitenden Phasen des pflanzlichen Stoffwechsels, kann sich nun erstrecken auf die Mechanik der Stoffaufnahme durch die Pflanzenzelle und dabei, ohne sich wesentlich um den Nährwert der verschiedenen Stoffe zu kümmern, fragen, welcherlei Stoffe von der Zelle aufgenommen und entweder in ihr festgehalten, gegebenenfalls auch gespeichert, oder wieder abgegeben und der Außenwelt oder Nachbarzellen zugeführt werden, welcherlei Stoffe andererseits nicht den Weg ins Zellinnere finden, sie kann ferner untersuchen, auf welchen Eigenschaften der lebenden Substanz und ihrer Organe einerseits, der ihr dargebotenen Stoffe andererseits es beruht, das die einen Stoffe resorbiert werden, die anderen nicht, sie kann im Anschluß daran die weitere Frage stellen, unter welchen Bedingungen sich die Durchlässigkeit des Protoplasmas ändert und die Bedeutung solcher regulatorischer Veränderlichkeit für den Pflanzenorganismus zu erkunden streben. Von solchen und ähnlichen Problemen soll im folgenden nur die eine Frage kurz gestreift werden, in welchem Aggregatzustand die von außen dargebotenen Stoffe ins Innere der Pflanzenzellen eindringen und über welche Mittel die Pflanze verfügt, um ihnen nötigenfalls die zur Aufnahme erforderliche Beschaffenheit zu verleihen. Im übrigen wird die Mechanik der Stoffaufnahme und -abgabe behandelt im Artikel „Turgor“, ist doch der Turgeszenzzustand, der den lebenstätigen, zellhautumkleideten Zellen der höheren Pflanzen eignet, von jener Mechanik abhängig.

Statt dessen soll auf den folgenden Blättern die Stoffaufnahme durch die Pflanzen nur insofern behandelt werden als die Fragen erörtert werden, welche chemische Grundstoffe für Bau und Leben der Pflanzen unerläßlich sind und durch welche Eintrittspforten und in welcher Bindungsform sie von den verschiedenen Gewächsen aufgenommen werden. Nur mit wenigen Worten wird dabei auch auf andere nicht unbedingt nötige Stoffe, die fast immer in den Pflanzen nachweisbar und meistens für den Stoffwechsel nicht ganz bedeutungslos sind, hingewiesen werden. Eine ganz wesentliche Einschränkung unseres Themas ist aber insofern gegeben, als die Aufnahme der Kohlensäure durch die grünen Pflanzen unter „Photosynthese“, durch die Nitro-, Schwefel- und Eisenbakterien im Artikel „Bakterien. Physiologie“, bereits dargestellt ist, und als die Artikel „Insektivoren“, „Saprophyten“ und „Parasiten“ die Aufnahme der organischen Kohlenstoffverbindungen durch die Pflanzen behandeln. Es wird also im folgenden in erster Linie von der Aufnahme der gemeiniglich als Nährsalze gebotenen Stoffe zu reden sein. Wegen der Aufnahme des Wassers und seiner Wanderung, soweit sie in den trachealen Bahnen erfolgt, ist auch auf den Artikel „Wasserbewegung“ hinzuweisen.

3. Aggregatzustand der aufzunehmenden Nährstoffe. Was zunächst den Aggregatzustand der aufzunehmenden Nährstoffe angeht, so ist es allbekannt, daß die meisten Pflanzenzellen, nämlich die zellhautumkleideten, ihre Nahrung nur als in Wasser oder wässeriger Lösung gelöste Stoffe aufzunehmen vermögen, seien diese Stoffe übrigens unter gewöhnlichen Bedingungen fest,

wie die Nährsalze und viele organische Stoffe oder flüssig, wie Glyzerin, oder gasförmig, wie das Kohlendioxyd und der Sauerstoff, oder Stickstoff, Wasserstoff und Methan, die im Stoffwechsel gewisser Bakterien eine Rolle spielen. Ueber den Lösungszustand, d. h. die Frage, ob es sich um ion- oder molekulardispare Stoffe, um Emulsoide oder Suspensoide handelt (vgl. den Artikel „Turgor".) Oft, das gilt in erster Linie für die verschiedenen Gase soweit sie durch an Luft grenzende Teile der Zelloberfläche aufgenommen werden, findet die Lösung erst in dem Augenblick statt, in welchem die Stoffe in die wasserdurchtränkte Zellhaut oder bei nackten Zellen ins Protoplasma eintreten. In Wasser schwer lösliche Stoffe verschafft sich die Pflanze häufig in der Weise in zureichender Menge, daß sie die minimalen, jeweils gelösten Spuren quantitativ absorbiert und so fortdauernd Bedingungen für weiteres Löslichwerden selbst schafft. Sodann kommt aber in Betracht, daß Stoffe von dem Organismus sezerniert werden, welche die Löslichkeit bestimmter in Wasser schwer löslicher Stoffe erhöhen. Im Reich der Schleimpilze und Verwandter, bei den Bakterien, Pilzen, ferner bei den Karnivoren (vgl. den Artikel „Insektivoren") unter den Blütenpflanzen spielen bekanntlich die Enzyme in dieser Hinsicht, soweit die Aufnahme organischer Nährstoffe in Betracht kommt, eine gewaltige Rolle, naturgemäß handelt es sich dabei im Gegensatz zu denjenigen Enzymen, welche im Interesse der Stoffwanderung und des Energiegewinns im Innern der Zellen tätig sind, stets um echte, aus lebenden Zellen ins Außenmedium austretende Ektoenzyme, die entweder in so großer Menge ausgeschieden werden, daß ihr Nachweis keine besonderen Schwierigkeiten macht, oder auch in so geringer Menge, daß sie nur schwierig, oder auch bislang gar nicht festzustellen waren. Abgesehen von Enzymen werden aber stets Säuren ausgeschieden, welche gegebenenfalls schwer lösliche mineralische Nährstoffe in großer Menge lösen können. Bei den Bakterien und Pilzen handelt es sich dabei außer um Atmungskohlensäure sehr häufig um die verschiedensten organischen Säuren, durch welche z. B. Phosphate des Bodens in Lösung überführt werden. Bekannt ist es, daß Flechten, als Pioniere sich ansiedelnd, durch ausgeschiedene Säuren Kalkstein, Glimmer, Granat angreifen (Bachmann; über die silikatangreifende Tätigkeit der Bakterien vgl. Bassalik. Ueber die Tätigkeit von Nitrobakterien auf Bergesgipfeln usw. vgl den Artikel „Bakterien. Nitrifikation durch Bakterien"). Auch indirekt ist eine Pflanzendecke von Bedeutung für die Lösung mineralischer Bestandteile, indem sie unter ihrer Oberfläche Wasser festhält, welches Silikate löst und so die erste Bedingung für deren Zersetzung schafft. Welche Säuren von den Wurzeln der höheren Pflanzen ausgeschieden werden, ist eine sehr viel umstrittene Frage. Ein Forscher nimmt an, daß außer Kohlensäure auch saure Phosphate ausgeschieden werden, ein anderer rechnet mit organischen Säuren wie Ameisen- oder Oxalsäure, wieder andere glauben, daß unter normalen Bedingungen lediglich Kohlensäure, bei mangelhaftem Luftzutritt aber auch Ameisen-, Essig-, Oxal-, Milchsäure ausgeschieden werde, doch könnten in den Versuchen dieser Forscher wohl Bakterien mit tätig gewesen sein. Pfeiffer und Blanck führen gegen die Annahme, daß nur Kohlensäure ausgeschieden werde, neuerdings wieder die ältere Beobachtung ins Feld, daß nicht alle Pflanzen gleich stark säuern mit ihren Wurzeln, z. B. Leguminosen stärker als Cerealien, was sich daraus ergibt, daß erstere Phosphorit stärker aufschließen als letztere. Schon früher hatte man gefunden, daß Hafer und Roggen stärker säuern als Gerste und Weizen. Aberson jedoch schließt aus seinen Bestimmungen der Wasserstoffionenkonzentration in den Wurzelsekreten, daß lediglich Kohlensäure sezerniert wird. Soviel steht fest, daß die Nährstoffe absorbierenden Spitzen der Wurzeln infolge von deren Atmungstätigkeit mit einer Kohlensäure gesättigten Wasserschicht überzogen sind, so daß Stoffe (Phosphate usw.), die in kohlensäurereichem Wasser leichter löslich sind, als in reinem, der Pflanze in erhöhtem Maße zur Verfügung stehen (vgl. auch True und Bartlett). Allbekannt ist der Sachssche Versuch, durch Wurzeln glatte Marmorplatten anätzen zu lassen und bei Ramann (Bodenkunde) kann man nachlesen, daß die korrodierende Tätigkeit der Pflanzenwurzeln an den Korallenfelsen des Mangrovegebiets in den Tropen sich dem Pflanzengeographen ohne weiteres aufdrängt. Auch die „Karrenbildung" im Gebirge ist auf die Tätigkeit der Vegetation zurückzuführen.

Neben der pflanzlichen Nährstoffaufnahme, die somit auf der Diffusion gelöster Stoffe ins Innere beruht, findet sich nun die sogenannte tierische Nahrungsaufnahme, d. h. Aufnahme fester Brocken, nur bei nackten Zellen, bei Acrasieen, Myxomyceten, bestimmten Peridineen und anderen Flagellaten, doch nehmen diese alle außerdem durch Diffusion gelöste oder von ihnen selbst löslich gemachte Stoffe ins Innere der lebenden Substanz auf. Wenn zellhautumkleidete Zellen höherer Pflanzen nur gelöste Stoffe resorbieren, so liegt das lediglich am Besitz einer Zellhaut, denn Pfeffer konnte nachweisen, daß durch experimentelle Eingriffe aus der Zellhaut ausgetretenes Protoplasma von Algen auch feste Partikelchen auf-

nehmen kann. Ohnehin fehlt ein prinzipieller Gegensatz zwischen pflanzlicher und tierischer Nährstoffaufnahme, weil auch bei letzterer die Stoffe erst gelöst werden, ehe sie dem Stoffwechsel hinter der Darmwand verfallen. Auch kann man bei Insektivoren ebensogut von tierischer Nahrungsaufnahme sprechen, wie bei höheren Tieren, weil auch bei jenen vielfach erst in inneren Körperhöhlen die Lösung der im festen Zustand aufgenommenen Nahrungsbrocken erfolgt. — Es sei endlich darauf hingewiesen, daß eine Art von Bindeglied zwischen der Aufnahme fester und gelöster Stoffe die Resorption der Fette durch die Zelle der höheren Pflanze darstellt, indem sie als solche im fein emulgierten Zustand durch die Zellhaut und das Protoplasma hindurchzutreten vermögen.

4. Orte der Nahrungsaufnahme am Pflanzenkörper. Wir wenden uns der Frage zu, welche Orte am Pflanzenkörper der Nahrungsaufnahme dienen. Unter Verweisung auf Allbekanntes genügt es daran zu erinnern, daß niedere Pflanzen, wie Bakterien usw. mit der ganzen Oberfläche ihrer vegetativen Zellen Nährstoffe aufzunehmen vermögen, daß aber schon bei vielen Pilzen Orte oder Organe bevorzugter Nährstoffaufnahme vorgebildet sind. Das ist u. a. leicht am Rhizopus nigricans zu sehen, wo bestimmte Hyphen der Ernährung, andere, ausläuferartige der Verbreitung dienen, oder etwa am Hausschwamm und Verwandten, wo analoge Arbeitsteilung nachzuweisen ist. Bei anderen Pilzen, bei welchen das gesamte Mycel im Substrat wuchert, ist es begreiflicherweise oft schwer und nur mit Hilfe subtiler Versuche zu entscheiden, ob das ganze Mycel der Nahrungsaufnahme dient, doch sind nicht selten auch bei solchen durch den mikroskopischen Anblick Saug- und Wanderhyphen zu unterscheiden. Ueber die Haustorien der parasitischen Pilze ist der Artikel „Parasiten" zu vergleichen. Algen des süßen und salzigen Wassers nehmen mit der ganzen Oberfläche, wie man sich meistens ausdrückt, die im Wasser gelösten Nährstoffe auf. Vielfach sind aber auch bei diesen zumal bei höher organisierten Meeresformen, bestimmte Teile ausgebildet, die der erleichterten Stoffzufuhr dienen. Es sei an Haarbüschel, sogenannte Pinselbildungen usw. erinnert, die offensichtlich im Dienste der Resorption und Assimilation der Kohlensäure und wohl auch der Nährsalze stehen, die bekanntlich meistens im Wasser nur in sehr verdünnter Lösung geboten sind (vgl. z. B. Kolderup-Rosenvinge). Die basalen als wurzelähnliche Gebilde, Krallen oder Haftscheiben ausgebildeten Teile des Thallus dienen von einigen Ausnahmen (Caulerpa) abgesehen, nicht der Nährstoffaufnahme für den übrigen Thallus, sondern nur der Anheftung am Substrat.

Im Gegensatz dazu dienen bekanntlich die Wurzeln der höheren Pflanzen und zwar die wachsenden Spitzen, sowie die basalwärts von diesen befindlichen wurzelhaartragenden Regionen der Aufnahme des Wassers samt Nährsalzen und allenfalls auch organischen Stoffen. Ueber die Vergrößerung dieser Teile durch Mykorrhizenbildung vgl. den Artikel „Mykorrhiza". Mittels der oberirdischen Teile, hauptsächlich der Blätter, wird vor allem Kohlendioxyd aufgenommen und zwar wie bekannt im wesentlichen durch die Stomata (vgl. den Artikel „Photosynthese"). Aber auch die Resorption anderer Stoffe, Lösungen von Zuckerarten, Glyzerin usw., ferner solcher, die meist in Form von Nährsalzen durch die Wurzeln erfolgt, kann durch die oberirdischen Teile besorgt werden, sei es im wissenschaftlichen Versuch, sei es unter natürlichen Bedingungen. Schon lange weiß man, daß Ammoniak aus der Luft durch die Blätter aufgenommen und assimiliert werden kann. Desgleichen besteht ein alter Versuch darin, daß man die Chlorose, die infolge mangelhafter Versorgung der Wurzeln mit Eisen hervorgerufen ist, durch Bestreichen der Blätter mit verdünnten Lösungen von Eisensalzen heilen kann. Auch Krankheitserscheinungen die Folge von Kalkmangel im Boden sind, können durch Bestreichen der kranken oberirdischen Teile mit Kalksalzlösungen beseitigt werden. Ueber eigenartige Orte der Nährstoffaufnahme bei Epiphyten ist der fragliche Artikel zu vergleichen. Auf einige vereinzelte Fälle, z. B. die eiweißreichen verzweigten Kolbenhaare der Azolla, die in die mit Anabaena bewohnten Höhlungen hineinragen und vielleicht der Nährstoffaufnahme dienstbar sind, kann nur kurz hingewiesen werden. — Was submerse Blütenpflanzen angeht, so ist die oft ausgesprochene Meinung, sie könnten mittels ihrer gesamten Oberfläche, vor allem aber mittels der oft stark zerteilten Blätter alle für ihr Leben nötigen Stoffe aufnehmen, nur für die wurzellosen Vertreter berechtigt, während die anderen (z. B. Helodea) offenbar auch auf die Tätigkeit ihrer im Grund wurzelnden Wurzeln angewiesen sind. Ausreichende experimentelle Behandlung dieser Frage fehlt aber noch. Sauerstoff wird durch die gesamte Oberfläche, oder aber in bevorzugter Weise durch Spaltöffnungen, Lenticellen aufgenommen. Die Wurzeln versorgen sich mit diesem Gas entweder direkt aus der Bodenluft, oder aber, bei Sumpfpflanzen, derart, daß der durch die oberirdischen Teile aufgenommene oder gebildete Sauerstoff durch die Interzellulargänge zu den im luftlosen Schlamm wachsenden Wurzeln hingepreßt wird. Eigenartige Atemwurzeln

und verwandte Gebilde sind im Artikel „Wurzeln" beschrieben. Die Aufnahme des Wassers ist im obigen bereits geschildert, soweit es Nährstoffe zuführt. Eine besondere Frage ist die, inwieweit auch atmosphärisches Wasser, Regen oder Tau den Pflanzen direkt zugute kommt, d. h. von den oberirdischen Teilen aufgenommen wird. Die Tatsache, daß reines Wasser auch von oberirdischen Organen aufgenommen und dann, z. B. durch Blutungsdruck anderen Teilen zugeführt werden kann, lehrt das Experiment und vielfache Versuche sowie auch die mikroskopische Betrachtung der Ausgestaltung bestimmter Haare als „Saughaare" weisen darauf hin, daß Haargebilde in besonderem Maße zur fraglichen Tätigkeit befähigt sind. Marloth wies durch Experimente nach, daß Pflanzen der südafrikanischen Wüste im reichen Maße befähigt sind, Tau mit den Blättern aufzunehmen, doch werden seine Ergebnisse angezweifelt (Schönland) und Fitting weist darauf hin, daß die Versuche am natürlichen Standort wiederholt werden müßten und wirft die prinzipielle Frage auf, ob überhaupt Wasser, welches leicht von den oberirdischen Teilen aufgenommen, darum jedenfalls auch leicht wieder abgegeben werden kann, in der Wasserökonomie solcher Gewächse eine wesentliche Rolle spielen kann. — Daß Pflanzen von bestimmter besonderer Organisation, wie Moose und manche Farnkräuter das Wasser durch ihre Blätter aufnehmen, nicht durch die Rhizoiden, ist bekannt.

Ein kurzer Hinweis auf die Stoffausscheidung aus dem Pflanzenkörper während des Lebens der Pflanze lehrt, daß eine gleich regelmäßige Abgabe von im Stoffwechsel unbrauchbaren Teilen wie bei tierischen Wesen nicht stattfindet, daß aber gleichwohl analoge Vorgänge auch bei Gewächsen zu beobachten sind (Geruchsstoffe usw.). Auf die Ausscheidung von Säuren ist oben schon kurz hingewiesen worden, von Bakterien und Pilzen werden vielfach auch basische Stoffe, vor allem Ammoniak, sezerniert.

Ueber die Ausscheidung von Gärprodukten usw. bei Gärungserregern belehren die betr. Artikel dieses Handbuchs. Auf die Ausscheidung von Giften, zumal durch Bakterien sei hier nur kurz hingewiesen. (Einiges darüber findet sich bei „Parasiten".) Aber auch höhere Pflanzen zeigen schon während ihres Lebens solche Abgabe von Stoffen, selbst wenn man von Wasserdampf und Kohlensäure ganz absieht. So ist zu erinnern an die Stoffe, die beim Laubfall abgestoßen werden oder beim Verlust anderer funktionsunfähig gewordener Organe — wir kommen auf diese Frage noch zurück, wenn wir darüber berichten, welche Nährstoffe vorher von den Pflanzen zurückgezogen und für den Stoffwechsel gerettet werden. Sodann ist bekannt, daß eine sehr allgemeine Erscheinung die Ausscheidung tropfbar flüssigen Wassers durch die Hydathoden ist. Mit diesem Wasser werden mannigfache Stoffe ausgeschieden. Wir erwähnen von Mineralstoffen kohlensaures Kalium, auch Nitrate und Phosphate, ferner zumal bei Wüstenpflanzen Chloride von Natrium, Magnesium, Kalzium. Die Ausscheidung kalkhaltiger Wassertropfen aus den Blättern der Steinbrecharten verrät sich nach dem Eintrocknen schon dem flüchtigen Anblick. Meistens dürfte es sich dabei um die Ausscheidung schädlicher oder unnötiger Produkte handeln. (Näheres in den physiologischen Handbüchern.) Eine noch nicht geklärte Frage ist die sogenannte „migration négative", d. h. die von manchen Autoren beschriebene Rückwanderung von Mineralstoffen aus den Wurzeln in den Boden (Déléano [1]; Mazé [2]). Auf die Diskussionen über die Ausscheidung spezifischer Stoffe durch das Wurzelsystem, mit welcher Sekretion auch die Bodenmüdigkeit in Beziehung gebracht wird, kann nur hingewiesen werden. Vgl. dazu u. a. Schreiner u. Sullivan.

5. Chemische Zusammensetzung der Pflanzen. Wir verschaffen uns nun, ehe wir uns der Aufnahme der Stoffe zuwenden, einen summarischen Ueberblick über die Zusammensetzung der Pflanze. Bei Pfeffer lesen wir, daß der Wassergehalt der lebenstätigen Pflanze, der starken Schwankungen unterliegt, bei saftreichen Pflanzen oder Pflanzenteilen 70 bis 90% beträgt, ja sogar bis zu 95% des Frischgewichts erreichen kann. Die Trockensubstanz des Protoplasmas, sowie jugendlicher, zarter Zellwände beträgt etwa 10 bis 30% des gesamten Frischgewichtes. Der Zellsaft enthält oft nur etwa 3% feste Bestandteile. Verholzte Wände führen etwa 50% Wasser, ganze Bäume 30 bis höchstens 70% Trockensubstanz. Im lufttrockenen Zustand befindliche Samen führen noch etwa 8 bis 14% Wasser.

In der Trockensubstanz weist nun die Elementaranalyse stets nach die folgenden Elemente: Kohlenstoff, der 38 bis 50% der Trockensubstanz ausmacht, Wasserstoff, dessen Gehalt um 5 bis 6% schwanken kann, Sauerstoff in einer Menge von 30 bis 40%. Sodann Stickstoff, dessen Gehalt stark wechseln kann; Stroh enthält knapp ½%, sonst finden sich 1,5 bis 6% Stickstoff; in sehr stickstoffreichen Samen, z. B. denen der Leguminosen auch fast 10%. Sodann finden sich stets und sind durch Ernährungsversuche als unentbehrlich nachgewiesen: Phosphor und Schwefel, Magnesium und Kalium,

ferner Calcium und Eisen, welche zwei letztgenannten Stoffe wenigstens allen höheren Pflanzen nötig sind. Nie vermissen wir endlich in Pflanzen, die an natürlichen Standorten gewachsen sind, Natrium, Aluminium, Chlor, Silicium. Ferner findet sich sehr häufig Mangan, auch Jod, das zumal in den Meeresalgen vorkommt, gelegentlich auch Lithium.

Verbrennt man die Tockensubstanz, so bleibt ein Aschengehalt von sehr verschiedener Größe zurück, er kann 1,5 bis 22% ausmachen. Meeresalgen enthalten etwa 15% Asche.

Es braucht kaum betont zu werden, daß die Pflanze die ihr von außen dargebotenen Stoffe nicht wahllos aufnimmt, daß sie vielmehr ein qualitatives und quantitatives Wahlvermögen besitzt. Stoffe, die in nur geringer Konzentration geboten werden, können gespeichert werden und zwar von verschiedenen Pflanzen in verschieden hohem Grade. Laminarien speichern aus dem Seewasser, welches Jod in kaum nachweisbaren Spuren enthält diesen Stoff so kräftig in sich auf, daß er mehr als 3% ihrer Asche ausmacht. Andere im gleichen Seewasser lebende Algen aber nur im geringeren Maß. Werden zwei Stoffe geboten, von denen der eine im Stoffwechsel wertvoll, der andere aber nutzlos ist, so wird der erstere im allgemeinen stärker in der Pflanze angehäuft, als der letztere. Beispielsweise wird aus Seewasser, das viel mehr Natrium als Kalium enthält, gleichwohl das letztere in bevorzugtem Maße durch die Algen aufgenommen.

6. Uebersicht über die unerläßlichen Grundstoffe. Ehe wir uns nun den einzelnen Elementen zuwenden, wollen wir uns die Frage vorwerfen, ob sie als solche, also in elementarer Form aufgenommen werden, oder in Form von chemischen Verbindungen. Diese Frage ist nun oben schon dahin beantwortet, daß eine Aufnahme in elementarer Form nur in verhältnismäßig wenigen Fällen vorkommt, die Aufnahme als chemische Verbindung aber in den meisten Fällen Regel ist. Illustrieren wir nun, indem wir die wichtigsten Elemente der Reihe nach durchgehen, diese Erfahrungstatsache.

Der Kohlenstoff wird nicht als Element in den Stoffwechsel einbezogen, sondern entweder in anorganischer oder organischer Bindung. In anorganischer Bindung, d. h. als Kohlendioxyd dient er, wie wir schon wissen, bestimmten Bakterien (vgl. die Artikel „Bakterien. Eisenbakterien", „Bakterien. Nitrifikation durch Bakterien" und „Bakterien. Physiologie") als Kohlenstoffquelle, ganz besonders aber den grünen Pflanzen (vgl. oben). Gewisse Bakterien können auch Kohlenoxyd verarbeiten, manche auch Methan, und diese letzteren führen über zu denjenigen Gewächsen, Pilzen und Bakterien, welche auf die Verarbeitung von organischen Kohlenstoffverbindungen angewiesen sind. Ueber die Frage, wieweit der Kohlensäurebedarf der autotrophen Pflanzen auch durch Karbonate und Bikarbonate gedeckt werden kann, ist der Artikel „Photosynthese" und „Bakterien. Nitrofikation durch Bakterien" zu vergleichen.

Was den Stickstoff angeht, so kennen wir (vgl. den Artikel „Bakterien. Stickstoffbindung") eine Anzahl von Heterotrophen, welche von freiem gasförmigem Stickstoff leben können, die sogenannten Stickstoffprototrophen. Alle anderen Wesen bedürfen der Stickstoffverbindungen, entweder der anorganischen, wie des Ammons, der salpetrigen und Salpetersäure bezw. deren Salzen, oder auch organischer Stickstoffverbindungen, vor allem eiweißartiger Verbindungen oder ihrer Spaltungsprodukte.

Es folgt der Sauerstoff. Dieser wird stets und von allen Pflanzen in gebundener Form im Wasser und in vielen Nährstoffen, seien es organische, oder anorganische aufgenommen; die Pflanzen, welche das fragliche Gas ausschließlich in gebundener Form aufzunehmen brauchen, nennt man anaerobe. In freier Form wird dies Gas von den aeroben Pflanzen, die man in konsequenter Fortführung der obigen Terminologie auch als Sauerstoffprototrophe bezeichnen könnte, aufgenommen. Uebrigens auch von den anaeroben, falls es in hinreichender, sie nicht schädigender Verdünnung geboten wird. Erwähnt ist oben schon, daß bestimmte Bakterien den Sauerstoff salpeter- und salpetrigsauren Salzen, andere schwefelsauren Salzen, welche sie spalten, entnehmen, so ihren Bedarf an Sauerstoff deckend (Denitrifikation und Desulfuration). Wir kommen später auf die Resorption des Sauerstoffs nicht mehr zurück, verweisen vielmehr auf die Artikel „Atmung", „Gärung", sowie „Bakterien. Physiologie".

Der Wasserstoff wird den Pflanzen in dem Wasser und vielen anderen anorganischen und organischen Verbindungen dargeboten. Als Gas wird er von bestimmten Bakterien, die ihn katalysieren, verwertet. Auch sonst spielt er eine Rolle bei der Stoffaufnahme, insofern als er dazu dienen kann, eventuell in statu nascendi, Schwefel zu Schwefelwasserstoff zu reduzieren und so diesen dem Bakterienstoffwechsel zugänglich zu machen. Man hat die Hypothese vertreten, daß er auch bei der Assimilation des freien Stickstoffs durch die Stickstoffprototrophen eine Rolle spiele, indem er den gasförmigen Stickstoff zu Ammon reduzieren soll.

Der Phosphor wird im allgemeinen als Phosphat, Orthophosphat geboten, kann aber auch organischen Phosphorverbin-

dungen, aus denen Phosphorsäure abgespalten wird, entnommen werden.

Schwefel kann in bestimmten Fällen mit Erfolg als elementarer Schwefel dargeboten werden, indem er, wie oben erwähnt, mittels Wasserstoffs reduziert und so in Bindung überführt wird. Meistens aber wird er als Sulfat dargeboten. Endlich sind zu erwähnen Kalium, Calcium, Magnesium und Eisen, die üblicherweise in Form anorganischer Salze aufgenommen werden. Auch die anderen oben erwähnten nicht unbedingt nötigen Grundstoffe, Natrium, Kieselsäure usw. gelangen im allgemeinen in der Form von mineralischen Salzen in die Pflanzen hinein.

Wir wenden uns jetzt einer etwas genaueren Besprechung der einzelnen Stoffe zu und beginnen mit denjenigen, welche gemeiniglich in mineralischer Form, als anorganische Nährsalze dargeboten werden und zwar mit den Basen (Kationen) um daran die Behandlung der Säuren (Anionen) zu knüpfen.

7. Aufnahme des Kaliums. Das Kalium ist wie längst bekannt für alle Pflanzen notwendig, nur bei den Cyanophyceen ist es noch fraglich, ob sie diesen Stoff entbehren können, und kann in der Kultur als geeignetes Salz, Nitrat, Phosphat, Chlorid, Sulfat usw. geboten werden. Solche Salze stehen auch in natura zur Verfügung, wenn die Pflanze auf Böden oder in Wässern wächst, die schon vorher eine Vegetation trugen, sonst liegt es in der Form verschiedener Silikate, als Kalifeldspat, Glimmer usw. vor. Nach Blanck ist Glimmer, zumal Biotit eine geeignetere Kaliquelle für die Pflanze als Feldspat. Muskovit ist zwar besser als Orthoklas, steht aber dem Plagioklas nach, der besser wirkt als Mikroklin und Orthoklas. Je nach der Qualität des Bodens werden lösliche Kalisalze verschieden stark absorbiert und auch da wo sie nur in geringer Menge vorhanden ist, genügt ihre Menge in den meisten Fällen für den Bedarf der Pflanze, da infolge dauernden Verbrauchs stets wieder neue Mengen in Lösung gehen. Von der Notwendigkeit Aecker mit Kalium zu düngen ist dabei abgesehen, von denen das Kalium mit der Ernte größtenteils entführt wird.

Für Kulturversuche ist zu beachten, daß aus der Wand gewöhnlicher Glasgefäße kieselsaures Kalium unter Abscheidung kolloidaler Kieselsäure durch den hydrolysierenden Einfluß des Wassers herausgelöst werden kann und selbst wenn das Kalium von der Kieselsäure fest absorbiert wird, so kann es doch durch andere in der Nährlösung vorhandene Basen oder Salze frei gemacht und der Pflanze zur Verfügung gestellt werden. Somit ist ein Ausschluß dieses Stoffes bei Verwendung kalihaltiger Glassorten nicht möglich.

Ueber die Bedeutung des Kaliums im Stoffwechsel ist so gut wie nichts bekannt. Aehnlich dem Phosphor findet es sich, laut makrochemischer Aschenanalyse in eiweißreichen Teilen wie Samen oder anderen biologisch gleichwertigen Organen, die sonst arm an Gesamtasche sind in erheblicher Menge, weniger z. B. im Holz. Pilze, so die Fruchtkörper der Basidiomyceten führen Kalium reichlich. Vielfach hat man aus seinem bevorzugten Vorkommen in wachsenden eiweißreichen Organen auf seine Mitwirkung bei Synthesen geschlossen. Ob es salzartige Verbindungen mit Eiweißkörpern bilden kann, die für den Stoffwechsel von Bedeutung sind, ist gänzlich ungewiß. Häufig wird ihm Bedeutung für die Wanderungsfähigkeit der Kohlehydrate im Pflanzenkörper zugeschrieben, wesentlich infolge von der Erscheinung, daß kaliarme Pflanzen pathologische Stärkeansammlung zeigen, die aber auch indirekt bedingt sein kann. Daß Kalisalze für besondere Funktionen, wie die osmotische Leistung des Zellsaftes in hohem Maße mit herangezogen werden überrascht nicht. Bestimmte Pflanzen, die ausnahmsweise reich an Kalium sind, wie Tabak, Kartoffel u. a. hat man als Kalipflanzen bezeichnet. — Interessante Ergebnisse hatten mikrochemische Studien, die Weevers in Fortsetzung früherer derartiger Untersuchungen anstellte. Nach ist auf mikrochemischem Weg Kalium stets in allen Pflanzen, mit Ausnahme der Cyanophyceen nachweisbar. Im Zellkern, sowie in den Chromatophoren ist Kalium nicht nachweisbar, auch im Chlorophyll fehlt es. In den Vakuolen kommt es reichlich vor; in großer Menge findet es sich in Vegetationspunkten, in Speichergeweben, im Siebteil, in den lebenden Elementen des sekundären Holzes, auch im Kambium. In den Pollenkörnern ist es fast immer reichlich nachweisbar, fehlt merkwürdigerweise aber dem Tulpen- und Krokuspollen. Wenn diese gleichwohl auskeimen, so sagt dies, daß Zellwachstum auch ohne Kalium oder mit Hilfe nicht nachweisbarer Spuren erfolgen kann. Eine Eiweißsynthese in der Pflanze kann aber gleichwohl an Kalium gebunden sein, da solche beim Pollenschlauchwachstum nicht stattfindet.

Was die Rolle des Kaliums im Stoffwechsel der Bäume angeht so ist beachtenswert, daß es nach Ramann [2] vor dem Laubfall, während die Blätter vergilben, wenigstens unter bestimmten Bedingungen wieder in die Pflanze zurückwandert. Interessant sind auch die Angaben desselben Forschers und Bauers, denen zufolge die verschiedenen Bäume zu verschiedenen Zeiten ihren Kalibe-

darf (gleiches gilt für andere Stoffe, vgl. unten) aus dem Boden decken. So nimmt beispielsweise die Lärche von Mitte Juni bis Mitte September, die Fichte schon im Mai und Juni, die Tanne noch früher die Hauptmenge des Kaliums, das sie im Jahr dem Boden entzieht in sich auf.

Für die meisten Pflanzen ist von den Alkalimetallen lediglich das Kalium unbedingt nötig. Nur für Meeresdiatomeen und andere Meeresalgen wird angegeben, daß sie auch der Natriumsalze zum Wachstum bedürfen. Denn es zeigt sich, daß sie in künstlichen Nährlösungen nur dann gut gedeihen, wenn ihnen außer den Salzen des Kaliums und den anderen nötigen Stoffen auch Natriumsalze dargeboten werden. Da über die Bedeutung des Kaliums nichts bekannt ist, läßt sich auch nicht sagen, ob in diesen Fällen das Natrium Funktionen übernimmt, welche bei den anderen Pflanzen vom Kalium allein getragen werden. Vielleicht dient auch das Natrium dazu, bestimmte schädliche Einwirkungen der Kaliumsalze auszugleichen, d. h. die Lösung „auszubalanzieren". Denn es ist bekannt, daß für die verschiedenen Zellen und Gewebe bestimmte Gemische verschiedener Salze, unabhängig von ihrem Nährwert im engeren Sinn, optimale Lebensbedingungen bieten, indem schädliche Wirkungen der einen durch Gegenwart der anderen behoben werden. So könnte das Natrium in den eben genannten Fällen das Kalium entgiften und erst seine Funktionen voll erfüllen lassen. — Was die Vertretbarkeit der Kalium- durch andere Alkalisalze angeht, so steht so viel fest, daß weder Lithium noch Natrium noch Ammonium sie vollständig vertreten kann. Doch vermag bei bestimmten Bakterien Rubidium und Caesium, falls sie in geeigneter Konzentration dargeboten werden, die Rolle des Kaliums zu übernehmen, so auch bei bestimmten Schimmelpilzen, doch beeinträchtigen die beiden genannten Basen die Conidienbildung. Bei höheren Pflanzen ist es bis jetzt nicht gelungen das Kalium durch Rubidium oder Caesium zu ersetzen, vielmehr lösten die beiden letzteren Elemente pathologische Wachstumserscheinungen an den Versuchspflanzen aus.

Ueber die Rolle des Kaliums im Stoffwechsel der kalkfeindlichen Gewächse vgl. weiter unten. Die Zufuhr des Kaliums bei Insektivoren und Mykorrhizapflanzen ist in den betr. Artikeln behandelt. Ueber Aufnahme von Natriumchlorid aus der Atmosphäre vgl. Blackledge.

8. Aufnahme des Magnesiums. Pflanzen, die der Magnesiumsalze entbehren können, sind nicht bekannt. Daß es für grüne Pflanzen unerläßlich ist, weiß man schon lange Zeit, später entdeckte man auch, daß die angebliche Ersetzbarkeit dieses Stoffes durch Calcium oder andere Metalle im Stoffwechsel von Pilzen, Hefen und Bakterien nicht zutrifft. Man pflegt es fast immer als schwefelsaures Magnesium den Nährlösungen zuzufügen, in vielen Fällen empfiehlt sich auch die Verwendung von phosphorsaurem Ammonium-Magnesium; so gibt man in einem Salz gleichzeitig Magnesium, Phosphor und Stickstoff und bei der Schwerlöslichkeit des genannten Salzes ist eine allzureichliche Zufuhr ausgeschlossen. In der Natur steht Magnesium vielfach als Bittersalz, das in trockenen Böden sogar auskristallisiert vorkommt, zur Verfügung, sonst als Silikat oder Magnesit oder Dolomit, bezw. als kreide- und magnesithaltiger Dolomit, und kann im Boden sehr fest absorbiert sein. Falls es sonst nicht genügend löslich ist, kann es durch die Säureausscheidung seitens der Pflanzenwurzeln in Lösung überführt werden. Zu beachten ist auch, daß es unter Umständen aus magnesiumsilikathaltigen Gläsern in Lösung übergehen kann und so eventuell in Kulturen unfreiwilligerweise den Pflanzen zur Verfügung gestellt wird.

Ueber die Bedeutung des Magnesiums und die Ursachen seiner Unentbehrlichkeit sind wir nicht unterrichtet. Einer der wenigen festen Punkte, auf die sich weitere Untersuchungen stützen können, ist der Magnesiumgehalt des Chlorophylls (vgl. den Artikel „Photosynthese"), aber da, wie erwähnt, auch chlorophyllfreie Pflanzen seiner benötigen, muß es noch andere Bedeutung im Pflanzenorganismus haben. Vielfach findet es sich vereint mit den Proteinstoffen in Samen. So kann es im geschälten Samen in weit größerer Menge vorkommen als das Calcium, während in der Samenschale das umgekehrte Verhältnis herrscht. Ein besonders hoher Magnesiumgehalt fettreicher Samen wird angegeben, auch in Milchsäften, im Kambium (Sieber) usw. ist es nachzuweisen. Für sich allein oder in unvollständigen Nährsalzlösungen geboten wirkt es oft besonders schädlich und diese schädliche Wirkung kann durch Beigabe von Kalksalzen behoben werden. Sehr auffallend sind Ausfallserscheinungen, die auftreten in magnesiumfreien Nährlösungen von Bakterien oder Pilzen, die normalerweise Farbstoffe bilden, indem diese Farbstoffbildung durch Entzug des Magnesiums auffallend stark beeinträchtigt wird. Zu erwähnen ist noch, daß Magnesium in höheren Pflanzen in auskristallisierter Form als oxalsaures Magnesium nachgewiesen worden ist.

Sämtliche Versuche, das Magnesium im Stoffwechsel durch andere mehr oder minder nahestehende Basen zu ersetzen, sind fehlgeschlagen.

9. Aufnahme des Calciums. Wir

kommen zum Calcium, einem weit verbreiteten Stoff, der darum in Pflanzen, die an natürlichen Standorten gewachsen sind, nie fehlt, gleichwohl aber nicht für die Ernährung aller Pflanzen nötig ist. Pilze, Bakterien und bestimmte Algen, nach Treboux auch Moose, können ohne Calcium gezüchtet werden. Wie sich höhere Pilze, Basidiomyceten in dieser Beziehung verhalten ist noch umstritten (Weir). Eine Förderung des Wachstums durch Kalkgaben auch bei solchen niederen Pflanzen, die es nicht als Nährstoff nötig haben, ist vielfach unverkennbar, vielleicht handelt es sich dabei teilweise um Ausbalanzierung von Nährlösungen, denn die entgiftende Wirkung der Kalksalze auf andere Salze ist oft überaus deutlich.

In Kulturen bieten wir das Calcium als Phosphat, Sulfat, Chlorid usw., häufig auch gemeinsam mit dem Stickstoff als Calciumnitrat, das vielen Pflanzen sehr zusagt, während andere Alkalinitrate bevorzugen.

Liegt es in Form eines Phosphates oder als Karbonat vor, so erleichtern sich die Wurzeln durch Kohlensäureausscheidung die Aufnahme dieser in kohlensäurehaltigem Wasser in nicht unerheblicher Menge löslichen Salze. In Boden findet es sich als Gips, der auch auskristallisieren kann, ferner als Silikat in chemischer Bindung, oder auch absorptiv gebunden. Wie wir des weiteren Ramann entnehmen, ist das kohlensaure Calcium darum von ganz besonderer Bedeutung für die Pflanze, weil es im Boden durch Absorption des Kalks zerlegt und dadurch der Boden vollkommen absorptiv gesättigt wird, indem die Kohlensäure entweicht und keine freien Säuren im Boden zurückbleiben; absorptiv gesättigter Boden erlaubt eine weit vollkommenere Ausnutzung der Nährsalze als ungesättigter, der sehr große Düngermengen beansprucht. Auch Wieler macht neuerdings ausdrücklich auf die hohe Bedeutung des Gehaltes der Böden an kohlensaurem Kalk aufmerksam. „Rauchschäden" der Gewächse können auf dem Auswaschen des Kalks aus dem Boden durch die schweflige Säure beruhen. Zu beachten ist andererseits, daß kohlensaurer Kalk lösliche Eisensalze ausfällt und somit der Pflanze die Aufnahme des Eisens erschweren kann. Auch in Wasserkulturen konnte Mazé [1] eine derartige Wirkung des Kalkkarbonates an der auftretenden Chlorose beobachten.

Was die Verbreitung des Calciums in der Pflanze angeht, so steht es an Menge dem Magnesium, erst recht dem Kalium in eiweißreichen, entwickelungsfähigen Teilen nach, in den Blättern pflegt es infolge des Transpirationsstromes in größerer Menge vorzukommen. In Holz und anderen Gerüststoffen ist es in reichlicher Menge vorhanden, so auch in Samenschalen und Fruchtschalen. Bekannt ist die Erscheinung, daß es in Zellen oder Zellwänden vielfach als Oxalat auskristallisiert, in Holz, Rinde, Blättern, Blütenteilen usw., kurz fast überall in den Organen grüner Gewächse, desgl. bei Algen und Farnen, während den Moosen Kalkoxalat fehlt. Bei Bakterien und Pilzen findet es sich in kalkhaltigen Nährlösungen meistens außerhalb der Zellen, doch kommt es bei einigen Pilzen auch im Zellinneren vor. Sodann findet sich das Calcium in der Pflanze in kristallinischer Form auch als Phosphat, z. B. bei bestimmten Sukkulenten, endlich in manchen Fällen als Karbonat, so in den Cystolithen von Ficus u. a. — Die frühere Meinung, es fehle den Vegetationspunkten der höheren Pflanzen, trifft nach neueren mikrochemischen Studien nicht zu. Auch im Kambium ist es nachweisbar.

Die Bedeutung des Calciums ist nicht minder unbekannt als die des Kaliums oder Magnesiums. Nur die Tatsache, die eben kurz erwähnt wurde, daß manche Algen und Moose ohne Calcium auskommen lehrt unzweideutig, daß wenigstens bei diesen Chlorophyllbildung und Assimilationstätigkeit nicht an die Gegenwart von Calciumsalzen gebunden ist. Viele Beobachtungen und Analysenergebnisse weisen darauf hin, daß Kalksalze für den Aufbau der Zellwände kalkbedürftiger Gewächse von Bedeutung sind. Beachtenswert ist der Befund Ramanns [1], daß in den Blättern der Holzgewächse der Kalkgehalt eine tägliche Periode zeigt, indem er nachts steigt, tags sinkt, was vielleicht darauf hindeuten könnte, daß der Kalkgehalt in irgendeiner Beziehung zur Abwanderung der Assimilate steht.

Schon die junge Keimpflanze bedarf des Kalks, denn fehlt er einer Nährlösung oder einem Boden, so macht sich das darin geltend, daß eine Ausnutzung der Reservestoffe des Samens unmöglich ist. Viel studiert sind die Krankheitserscheinungen, die infolge von Kalkmangel an grünen Gewächsen auftreten und die den Eindruck einer Vergiftung machen. Bei Bohnen beobachtet man am Hypokotyl an einer bestimmten Stelle den Austritt eines Tropfens, die Stelle wird dann glasig und bräunt sich. Die Wurzeln bräunen sich gleichfalls und stellen ihr Wachstum ein. Rechtzeitige Kalkzufuhr zu den erkrankten Wurzeln oder oberirdischen Teilen heilt diese Symptome. Wie solche Vergiftungen zustande kommen, ist fraglich, die Ansicht, es handle sich lediglich um die Wirkung freier Oxalsäure, ist zum mindesten unbewiesen. Wie oben schon kurz angedeutet, ist die entgiftende Wirkung der Kalksalze gegenüber der schädlichen Wirkung anderer Salze sehr auffallend. Bohnen und andere Pflanzen von höherer oder einfacherer Organisation sterben in kalkfreien, sonst aber vollständigen Nährlösungen früher ab, als im reinen Wasser,

geringe Kalkgaben verhindern diesen Tod. Derselbe kann bei Kalkmangel durch die verschiedensten Salze bewirkt werden, vielfach aber tritt die Erscheinung bei Einwirkung von Magnesiumsalzen besonders deutlich auf.

Sucht man Kalk durch andere Basen zu ersetzen, so mißlingt das, immerhin zeigt sich, daß Gegenwart von Strontium und wohl auch Baryum den durch Kalkmangel bedingten Tod hinausschiebt.

Bedürfen somit alle höheren Pflanzen des Calciums, so ist eine sehr bekannte und noch nicht recht geklärte Erscheinung die, daß bestimmte Pflanzen, so das Torfmoos, der Besenginster, die Kastanie, kalkfeindlich sind, genauer gesagt einen Boden meiden, der einen zu großen Gehalt an Kalkkarbonat besitzt. Mancherseits wird angenommen, daß die Ursache in einer durch diesen Stoff bedingten verminderten Aufnahmefähigkeit für Kalium oder für Eisen liege, doch fehlt noch eine klare Einsicht in diese für die Pfanzengeographie wichtige Frage. Manche Pflanzen sind nur insofern kalkfeindlich, als sie auf Kalkböden nur dann fortkommen, wenn ihnen nicht die Konkurrenz mit anderen Pflanzen den Kampf ums Dasein erschwert

Es sei noch darauf hingewiesen, daß auch das Calcium, wie wir das schon für das Kalium hörten, von verschiedenen Holzgewächsen nicht gleichzeitig aufgenommen wird. Nach Ramann und Bauer nimmt die Lärche im Juni bis November sehr viel Calcium auf, ebenso die Fichte, die aber im Gegensatz zu jener sich auch im Mai bis Juni kräftig mit Calcium versorgt, während die Aufnahme seitens der Tanne sich gleichmäßig über die ganze Zeit vom März bis zum November erstreckt.

Ueberflüssig aufgenommener Kalk wird vielfach durch die Hydathoden wieder ausgeschieden, wie vorhin schon kurz gesagt wurde. Auch die massenhafte Ablagerung von Kalkoxalat steht offenbar im Dienst der Unschädlichmachung zu reichlich aufgenommenen Kalks. Eine Rückwanderung des Kalks vor dem Blattfall konnte weder von Ramann [2] noch von Déléano [1] beobachtet werden. Ueber den Kalk bei der Mykotrophie vgl. den Artikel „Mykorrhiza".

10. Aufnahme des Eisens. Das Eisen welches im Boden als Oxydhydrat oder Silikat, in Wässern z. B. als Oxydulkarbonat vorkommt und den Pflanzen zur Verfügung steht, bieten wir in Kulturen als Ferrichlorid oder Ferrosulfat, welche Salze aber nur in geringer Menge angewendet werden dürfen, da sie sonst giftig sind, oder als Phosphat (Ferrophosphat nach v. d. Crone) oder Karbonat (vgl. den letzten Abschnitt). Es ist für alle höheren Gewächse unentbehrlich, da sie in eisenfreien Lösungen gezüchtet, kein Chlorophyll ausbilden können, vielmehr der Chlorose verfallen und verhungern, wenn sie nicht bei Zeiten mit Eisen geheilt werden. Bakterien, Pilze, Algen kann man auch ohne Eisenzusatz züchten; vielleicht bedürfen sie desselben nicht, vielleicht genügen äußerst geringe, nicht nachweisbare Spuren. Warum zur Bildung des Chlorophylls der höheren Gewächse das Eisen nötig ist, ist darum rätselhaft, weil dieser Farbstoff selbst eisenfrei ist. Es scheint sich um eine Art katalytischer Wirkung des Eisens zu handeln, mit welcher Annahme zunächst allerdings nicht viel gewonnen ist. In der Literatur liegen eine ganze Zahl von Angaben vor, daß auch unabhängig von Eisenmangel eine der Chlorose ganz gleiche Erkrankung, aber von anderer Aetiologie vorkommt; so berichtet v. d. Crone von einer durch lösliche Phosphate hervorgerufenen Chlorose. In allen Fällen in denen das typische Bild der Chlorose, nicht etwa bloß Vergilbung des Chlorophylls oder ähnliche Erscheinungen auftreten, handelt es sich dabei aber zweifellos stets um eine durch die Ernährungsbedingungen bedingte, auf Ausfällung der Eisensalze beruhende Erschwerung der Eisenaufnahme. — Manche chemische Verbindungen, die in den Pflanzen vorkommen, u. a. eine Nukleinsäure aus Hefe, aus dem Hafer, sollen eisenhaltig sein (?), können also in eisenfreien Lösungen nicht gebildet werden. Ob es für die genannten Pflanzen essentielle Verbindungen sind, ist unbekannt.

Es liegen einige fruchtlos verlaufene Versuche vor, das Eisen durch Mangan oder andere Stoffe zu ersetzen. Wir wollen darauf nicht eingehen, doch ist hier der Ort darauf hinzuweisen, daß das Eisen zu denjenigen Stoffen gehört, die vielfach eine sogenannte Reizwirkung ausüben, indem sie, auch wenn sie zur Ernährung nicht unbedingt nötig sind, doch Wachstumsbeschleunigung, Erhöhung der Ernte infolge ökonomischerer Ausnutzung der Nährstoffe ermöglichen. Solche Reizwirkung, die übrigens auch von organischen Stoffen, die die Pflanze selbst regulatorisch bilden kann (z. B. Solanin), ausgeht, wohnt neben dem Eisen auch dem Zink, Kupfer, Quecksilber, Mangan und vielen anderen Stoffen inne, die in stärkerer Konzentration geboten giftig wirken. Zumal die Literatur, welche von der Ernährung der Pilze (Aspergillus niger) handelt, strotzt von Arbeiten über die Reizwirkung solcher Stoffe, aber sie wurde auch bei der Beobachtung von Wasserkulturen höherer Pflanzen gefunden. So wird, um nur ein Beispiel zu nennen, das Wachstum des Weizens in Nährlösungen durch Mangansulfat stimuliert.

Ueber die Bedeutung des Eisens bezw. Mangans für die Eisenbakterien vgl. diese.

Ueber eigenartige eisenspeichernde Pilze (Citromyces sideropous u. a.), die durch Ferrosalze, auch wenn sie in starker Konzentration geboten werden, gefördert werden, berichtet Lieske; Ferrisalze hemmen ihr Wachstum, werden aber reduziert und der dabei disposibel werdende Sauerstoff wahrscheinlich zur Atmung verwendet.

11. Aufnahme der entbehrlichen mineralischen Basen. Wir haben die Besprechung der für die Pflanzen unbedingt nötigen basischen Mineralbestandteile erledigt. Doch haben wir schon oben darauf hingewiesen, daß neben diesen von den allverbreiteten sonstigen Metallen eine ganze Zahl häufig in der Pflanze nachweisbar sind. Es genüge hier darauf hinzuweisen, daß **Aluminium**, zumal in Pflanzen die auf Alaunböden wachsen, sehr häufig ist, z. B. in Symplocos u. a. m. Ferner enthält die Asche von Lycopodium alpinum bis zu 17% Aluminium. Nach Rothert nehmen überhaupt alle Pflanzen das Aluminium sofern es in zugänglicher Bindungsform ihnen dargeboten wird auf, doch wird es größtenteils in den Wurzeln zurückgehalten. — Ueber die entstärkende Wirkung von Aluminiumsalzen vgl. Fluri und Szücs.

Auch Mangan kann in großer Menge in den Pflanzenaschen auftreten, z. B. in Holz und Rinde von Bäumen.

Wir kommen jetzt zu den Nährelementen, die in den Anionen der Nährsalze enthalten sind.

12. Aufnahme des Schwefels. Der Schwefel steht den Pflanzen in anorganischer Bindung als Sulfat im Boden und in Gewässern zur Verfügung. Dies Sulfat kann biogenen Ursprungs sein; auch hauchen Vulkane schweflige Säure aus, die als Schwefelsäure dem Boden zugeführt wird. Ein großer Teil des Sulfates der Böden entstammt auch dem Salzstaub, welcher durch Winde dem Meer entführt und der Feste zugetrieben wird. Humus hält Schwefel in organischer Bindung, welcher allmählich mineralisiert wird.

In Kulturen verwendet man meistens Bittersalz oder ein anderes Sulfat.

Der Schwefelbedarf der Pflanzen ist insofern begreiflich, als die Eiweißkörper schwefelhaltig sind, welcher Schwefel in Form des Cystins aus ihnen abgespalten werden kann. Bei der Keimung und dem damit verbundenen Abbau der Eiweißreserven der Samen wird der in den Proteinkörnern vorhandene Schwefel „mineralisiert" und ist dann als Schwefelsäure in den Keimlingen nachweisbar. Auch für die Synthese der Senf- und Lauchöle ist der Schwefel unerläßlich. Offenbar bedürfen seiner alle, auch die einfachst organisierten Pflanzen, freilich ist der strenge Beweis nicht immer leicht zu führen, weil der Bedarf oft so gering ist, daß Verunreinigungen der anderen Nährstoffe oder flüchtige Schwefelverbindungen der Luft genügen um diesen Bedarf zu decken. Ueber die Bedeutung der Bakterien für den Kreislauf des Schwefels vgl. die Artikel „Bakterien. Physiologie" und „Bakterien. Schwefelbakterien".

13. Aufnahme des Phosphors. In Kulturen bietet man der Pflanze meistens Orthophosphat, übrigens als Kali-, Kalk- oder Eisensalz. Daß phosphorsaures Ammonium-Magnesium oft sehr günstig wirkt, hörten wir früher. Sodann ist zu erwähnen, daß man je nachdem man primäre oder sekundäre Alkaliphosphate bietet, die Reaktion der Nährlösung je nach Bedarf schwach sauer oder alkalisch machen kann. Auch organische P-Verbindungen bewähren sich als Nährstoffe, z. B. Phytin für Pilze (Jegoroff). Im Boden findet die Pflanze Phosphorite (phosphorsaures Calcium), sodann z. B. in Mooren Ferrophosphat, auch kolloidale Ferriphosphate (Ramann, Bodenkunde) endlich Gemische von Eisenphosphaten mit Kalk und Eisenkarbonaten. Da Phosphorite in kohlensäurehaltigem Wasser leichter löslich sind als in reinem, kommt die Atmungskohlensäure für ihren Aufschluß in Betracht. Zu beachten ist, daß bei Gegenwart von Eisenoxyd die löslichen Phosphate in schwer lösliche Eisenphosphate überführt werden, woraus folgt, daß Gegenwart von viel Eisenoxyd die Resorbierbarkeit der Phosphorsäure herabsetzt. Die bekannte starke Absorbierbarkeit der Phosphate in absorptiv gesättigten Böden, — in sauren Böden ist die Phosphorsäure stark beweglich, beruht wesentlich auf chemischer Bindung, weniger auf physikalischer Adsorption. Im Humus findet sich organisch gebundener Phosphor der allmählich mineralisiert wird.

Was die Verteilung des Phosphors in der Pflanze angeht, so zeigt sich, daß er dem Kalium ähnlich sich verhält, und vorwiegend in eiweißreichen entwicklungsfähigen Teilen, wie Samen, Rhizomen usw. sich findet, weniger im Holz. Im Kambium ist er nachweisbar. Im Zellsaft kann er als Phosphat in größerer Menge gespeichert werden, sonst aber findet er sich wesentlich in organischer Bindung, so z. B. in den Samen; in diesen findet er sich erstens in Form von Phosphaten, aber nur in geringer Menge; zweitens in Form organischer P-Verbindungen, die in verdünnten Säuren, eventuell auch in Wasser, löslich sind (z. B. Phytin), drittens als Lezithinphosphorsäure, viertens als in verdünnten Säuren unlöslicher Eiweißphosphor. Bei der Keimung der Samen wird er enzymatisch als Phosphorsäure abgespalten. Die betreffenden Enzyme sind

z. B. im Gerstenkorn fertig vorgebildet, im Maiskorn entstehen sie erst während der Keimung (Vorbrodt). Beim Laubfall pflegt die Phosphorsäure der Pflanze gerettet zu werden, indem sie aus den vergilbten Blättern zurückwandert. Die Zeit der hauptsächlichsten Aufnahme der Phosphate aus dem Boden fällt nach Ramann und Bauer bei der Lärche in die Zeit vom September bis November, bei der Kiefer findet sie statt im Juli bis September. Die Tanne deckt ihren Bedarf an Phosphaten früher im Jahr als die Fichte.

Die wesentlichsten organischen Phosphorsäureverbindungen, die in den meisten Pflanzen vorkommen, sind zunächst die Nukleoproteide, die 0,3 bis 3% Phosphor enthalten und bei der Spaltung in Eiweiß- und Nukleinsäure übergehen, welch letztere Purin- und Pyrimidinkörper sowie Kohlehydrate an Phosphor gebunden enthalten. Sodann sind zu nennen die phosphorhaltigen Proteide (früher: Nukleoalbumine), die keine Nukleinsäure enthalten. Ferner ist als phosphorhaltiger Körper zu nennen die Inositphosphorsäure, die als Salz (Phytin) in Samen usw. vorkommt, endlich die verschiedenen Phosphatide, ätherlösliche Stoffe, die bestehen aus einer Verbindung von Glycerin, an welches sich Fettsäurereste anlagern mit Phosphorsäure, welche sich mit einer Base (z. B. Cholin im Lecithin) verbindet. Aus dem steten Vorkommen solcher Stoffe in der lebenden Substanz wird die Notwendigkeit der Phosphorzufuhr verständlich. Was die Ausscheidung von Phosphaten angeht, so ist oben die Annahme kurz erwähnt, daß in Wurzelsekret saure Phosphate ausgeschieden werden, doch dürften dieselben verletzten Zellen entstammen.

Ueber die eigenartige Mitwirkung von Phosphorsäureestern bei der Tätigkeit des Enzyms der alkoholischen Gärung vgl. den Artikel „Gärung".

14. Aufnahme des Siliciums, Chlors, Jods. Was das Silicium angeht, so ist sein Vorkommen im Boden für die Landpflanze von höchster Bedeutung, weil neben den Humusstoffen wasserhaltige Silikate — Aluminatsilikate und Tonerde-Doppelsilikate, Magnesium- und Calciumsilikate (Hornblenden), Feldspate und amorphe Kieselsäure — die wichtigsten Träger der Absorption im Boden sind (Ramann, Bodenkunde). Man kann wohl sagen, daß Silicium sich in der Asche von Pflanzen, die an natürlichen Standorten erwachsen sind, stets findet, die Asche des Adlerfarns soll zur Hälfte aus Kieselsäure bestehen können. Gleichwohl ist es für die allermeisten Pflanzen entbehrlich; dabei kann eine reichliche Aufnahme der Kieselsäure und dadurch bedingte Verkieselung der Membran, über deren Verlauf neuerdings Abshagen berichtet, für die Pflanze wohl von Bedeutung sein, darauf deuten Versuche, nach denen kieselsäurefrei gezogene Pflanzen den Angriffen von tierischen und pflanzlichen Schmarotzern leichter erliegen als kieselsäurereiche; zumal für den Fall, daß die sonstigen Ernährungsbedingungen ungünstig und die Zellen mit dünnen Zellhäuten ausgestattet sind, dürfte das zutreffen. Ueber das Vorkommen von Kieselkörpern (Stegmata) in Zellen vgl. d. Lit. Eine Rückwanderung der Si aus den vergilbenden Blättern der Holzgewächse ist nicht nachweisbar (Déléano, Ramann). Soweit Diatomeen untersucht worden sind, hat es sich herausgestellt, daß für ihr Leben, genauer gesagt für den Aufbau ihrer Zellwände, die vielleicht eine organische Kieselsäureverbindung enthalten, die Zufuhr von Kieselsäure unerläßlich ist.

Nun noch einige Worte über die Halogene: Daß das Chlor, obwohl allverbreitet und stets in den Pflanzen, zumal Meeres- und Strand- oder Salzpflanzen, nachweisbar, gleichwohl entbehrlich ist, haben wir oben schon betont; jedenfalls ist die Entbehrlichkeit für manche höhere wie auch niedere Pflanzen (z. B. Diatomeen) sicher nachgewiesen. Auch die untersuchten Meeresdiatomeen bedürfen kein Chlor, die Untersuchung weiterer Meerespflanzen mit Rücksicht auf diese Frage wäre vielleicht erwünscht.

Das Jod findet sich, wie oben gesagt, in Meeresalgen; Laminarien enthalten in der Asche 3 bis 6% Jodnatrium, der Sägetang z. B. nur 1,5%. Auch Rotalgen und Planktonorganismen sind jodhaltig, aber auch bei bestimmten Süßwasseralgen ist es nachgewiesen. Notwendig aber scheint das Jod für das Wachstum nicht zu sein, jedenfalls kann man z. B. bestimmte Meeresdiatomeen ohne Jodzufuhr züchten. Auch Brom soll spurenweise in Meeresalgen vorkommen.

15. Stickstoffaufnahme durch die Pflanze. Während bei den bislang abgehandelten Elementen die Aufnahme aus anorganischer Bindung die weitaus wichtigste war, liegen beim Stickstoff die Dinge insofern anders, als hier nicht nur stickstoffhaltige Nährsalze, sondern auch organische Stickstoffverbindungen, sowie der freie Stickstoff zu beachten sind. Werfen wir zuerst einen Blick auf die Formen in denen der Stickstoff der Pflanze zur Verfügung steht.

Was zuerst den gasförmigen Stickstoff angeht, so können sich die Mikroorganismen, soweit sie ihn verwerten können, ihn aus Luft und Wasser und Bodenluft verschaffen. Von Bodenteilchen, zumal von Eisenoxydhydrat wird er kräftig absorbiert und Hypothesen über die Bedeutung

dieser Erscheinung für die Stickstoffbindung durch Kleinlebewesen des Bodens fehlen nicht.

An anorganischen Stickstoffverbindungen kommt zuerst in Frage das den sich zersetzenden Eiweißkörpern entstammende Ammon, das entweder als Salz, z. B. als Sulfat, im Boden festgelegt wird oder aber frei oder als Ammoniumkarbonat in die Atmosphäre entweicht. Durch derartige Verdunstung kann es der Vegetation zunächst verloren gehen, wird allerdings durch saure Böden der Atmosphäre auch wieder entrissen. In der Kultur wird es meist als Sulfat, wohl auch als Phosphat z. B. als phosphorsaures Ammoniummagnesium dargeboten. — Salpetrige Säure und ihre Salze häufen sich im Boden nur in ganz seltenen Fällen an und werden auch selten als Nährstoffe vom Experimentator verwendet. Als dritte anorganische Stickstoffquelle ist zu nennen die Salpetersäure, die als Salz, z. B. als Nitrat zur Verwendung und zur Aufnahme in die Pflanze gelangt. Sie wird, wie im Artikel „Bakterien. Nitrifikation durch Bakterien" zu lesen ist, dauernd bei Luftzutritt durch die Tätigkeit der Nitrifikationsbakterien aus Ammon oder salpetriger Säure gebildet; auch die Salpeterlager sind bakteriogenen Ursprungs. Sodann entsteht bei elektrischen Entladungen in der Atmosphäre aus gasförmigem Stickstoff reichlich Untersalpetersäure, welche mit Wasser salpetrige und Salpetersäure bilden, die niedergeschlagen werden und den Pflanzen zugute kommen. Im Gegensatz zum Ammon wird Salpetersäure nicht im Boden absorbiert, darum leicht ausgewaschen, dann endlich dem Meere zugeführt, wenn sie nicht vorher von den Pflanzen der Flüsse oder Bäche assimiliert und so festgelegt wird.

Was die organischen Stickstoffverbindungen angeht, so würde es zu weit führen, sie im einzelnen zu nennen, soweit sie von heterotrophen Pflanzen verwertet werden können. Wie bekannt, handelt es sich um mehr oder minder weit abgebaute Eiweißkörper, die aus Pflanzen und Tierleichen stammen und um diese Eiweißkörper selbst, sodann um andere stickstoffhaltige Produkte, z. B. Harnstoff, Hippursäure, die schon während des Lebens den tierischen Leib verlassen. Auch der Humus ist stickstoffhaltig und kann, nach Ramann 1 bis 8, im Extrem sogar bis 20% Stickstoff enthalten. Im allgemeinen soll in trockenen Gebieten der Stickstoffgehalt des Humus beträchtlicher sein, als in feuchten. Der Stickstoffgehalt des Humus ist ein sicher angelegtes „Kapital", aus welchem Stickstoffverbindungen allmählich durch fortschreitende Mineralisierung frei und den Pflanzen zugänglich werden.

Damit sind die wichtigsten Stickstoffverbindungen aufgezählt, die den Pflanzen von der Außenwelt zur Verfügung gestellt werden, um die mannigfachen Stickstoffverbindungen aufzubauen, die sie enthalten, vor allem die Proteide und Proteine, die Albumosen, Peptone (Polypeptidgemische) und Aminosäuren und deren Verbindungen, sodann die verschiedenen Alkaloide, Indolderivate, Amine, Körper der Purin- und Pyrimidingruppe, um sie ganz summarisch zu nennen. Auch anorganisch gebundener Stickstoff kann am Aufbau der Pflanze teilnehmen, insofern als Salpeter, bevor er reduziert wird und dem Eiweißaufbau dient, sich in größeren Mengen im Zellsaft ansammeln und so transitorisch auch als Turgorstoff dienen kann. Wie Nathansohn fand, sind u. a. auch die Planktonpflanzen dazu befähigt, das Nitrat, das sie in geringen Spuren im Seewasser vorfinden, in ihrem Zellsaft zu speichern, wie sich aus der Blaufärbung mit Diphenylaminschwefelsäure ergibt. Pflanzen, die reichlich Salpeter in ihrem Zellsaft aufzuspeichern pflegen, nennt man danach Salpeterpflanzen.

Beginnen wir nun mit einem Blick auf die Assimilation des freien Stickstoffs, so können wir, soweit Bakterien und nächste Verwandte in Betracht kommen, auf den Artikel „Bakterien. Stickstoffbindung" verweisen. Ergänzend wäre noch zu sagen, daß ganz neuerdings auch jene Bakterien, die in den Knoten der Blätter tropischer Rubiaceen, und zwar interzellulär hausen, als stickstoffbindende Formen angesprochen werden (v. Faber). Abgesehen von diesen Bakterien wird aber noch von einer ganzen Zahl anderer Pflanzen behauptet, daß sie den Stickstoff zu binden vermöchten, z. B. von Cyanophyceen, ganz besonders aber von Pilzen, so von Aspergillus, Penicillium, Botrytis cinerea, Dispora molinioides, Epicoccum purpurascens, Melanomma, Cladosporium, Macrosporium, Phoma, u. a. (Fröhlich, Rahel, vgl. auch Oes). Teilweise sollen sie nur dann den freien Stickstoff binden, wenn ihnen etwas gebundener Stickstoff zur Verfügung gestellt wird. Auch ein Pilz aus torfigem Boden, der vielleicht Mykorrhizen bildet, wird als Stickstoffbinder genannt. Ferner sollen auch bestimmte Hefen, besonders kahmhautbildende Saccharomyceten, Monilien und Oidien den freien Stickstoff binden (Kossowicz). Soweit jene Pilze in der Natur auf gefallenem Laub und anderen Substraten die verhältnismäßig arm an Stickstoffverbindungen, aber reich an stickstofffreien Stoffen sind, leben, ist die Ansicht, daß sie das Kapital an gebundenem Stickstoff durch ihre Lebenstätigkeit vermehren, im höchsten Maße plausibel. Immerhin hoffe ich den Autoren dieser Arbeiten

nicht zu nahe zu treten, wenn ich Zweifel daran hege, ob die Befähigung zur Stickstoffbindung wirklich in allen diesen Fällen über allen Zweifel erhaben ist. Vielfach sind die gefundenen Mengen von gebundenem Stickstoff so klein, daß sie innerhalb der Fehlergrenzen zu liegen kommen. Weitere Untersuchungen sind also im höchsten Grad erwünscht.

Wir kommen zur Assimilation der Stickstoffverbindungen und betonen zuerst, daß sämtliche Pilze und Bakterien, deren Befähigung zur Bindung des freien Stickstoffs man mehr oder minder sicher nachgewiesen hat, auch von Stickstoffverbindungen leben können. Sehen wir aber von diesen Formen ab und wenden wir uns zunächst der Aufnahme anorganischer Stickstoffverbindungen zu, so ist zu erwähnen, daß viele niedere Pflanzen wie Bakterien, Pilze (vgl. u. a. Brenner), Algen trefflich mit solchen gedeihen, wie man des weiteren bei „Bakterien“ und „Saprophyten“ nachlesen mag. Viele Bakterien und Fadenpilze gedeihen sehr gut, wenn sie Salpeter als Stickstoffquelle erhalten, meistens ziehen sie Ammonstickstoff vor und für die „Hefen“ gilt, daß sie zum großen Teil den Salpeterstickstoff nicht verwerten können. Ueber Stickstoffaufnahme durch Hefen vgl. im übrigen den Artikel „Gärung“. Auch Algen können im allgemeinen Salpeter und Ammonstickstoff, meistens wohl letzteren etwas besser als ersteren benutzen. Auch Nitrite werden von den eben genannten Formen wohl verwertet, wenn die Lösung nicht sauer reagiert, d. h. keine freie salpetrige Säure enthält. Alle daraufhin untersuchten Schimmelpilze, die Nitrate verwerten, können auch Nitrite ausnutzen und reduzieren in den Kulturen die ihnen gebotenen Nitrate zu Nitriten (Ritter; dort Literatur). Für die Blütenpflanzen gilt im allgemeinen dasselbe; auch sie können Salpeter, Ammon und den Stickstoff der salpetrigen Säure verwerten; bekannt ist, daß zumal in natura der Salpeter die bevorzugte Stickstoffquelle derselben ist, doch ziehen, wie Versuche ergeben, manche den Ammonstickstoff vor und liefern, mit ihm ernährt, höhere Ernten. Allgemeines läßt sich darüber kaum sagen, weil die Verwertung der Stickstoffnahrung im weitesten Maße von den sonstigen Ernährungsbedingungen abhängig ist. Vielfach findet sich in der Literatur die Angabe, daß die Ammoniumsalze „physiologisch sauer“, die Nitrate aber „physiologisch alkalisch“ seien. Darunter ist folgendes zu verstehen: Bietet man einer Pflanze Ammoniumsalze, etwa schwefelsaures Ammon, so nimmt sie von diesem in Lösung stark hydrolytisch dissoziierten Salz vorwiegend das Ammon auf, Schwefelsäure bleibt zurück und säuert den Boden bezw. die Nährlösung. Diese Säuerung kann für die Stoffaufnahme von ähnlicher Bedeutung werden, wie die Wurzelausscheidung und kann dazu führen, daß schwer lösliche Salze leichter löslich und leichter aufnehmbar gemacht werden; so konnte z. B. Prianischnikow [1] nachweisen, daß die Pflanze den Phosphor aus Tricalciumphosphat, Knochenmehlphosphat oder Phosphorit bei Gegenwart von kohlensaurem Kalk nur dann leicht ausnutzen kann, wenn als Stickstoffquelle das physiologisch saure Ammonsulfat geboten wird und eine ganze Reihe analoger Erfahrungen liegen sonst noch in der landwirtschaftlichen Literatur vor. — Wenn andererseits Nitrate z. B. Kalinitrat, als physiologisch alkalische Salze bezeichnet werden, so mag man sich vorstellen, daß die ausgeschiedene Atmungskohlensäure das Kalinitrat teilweise zerlegt in Kaliumkarbonat und freie Salpetersäure, daß die Pflanze sodann die in Spuren freigewordene Salpetersäure resorbiert, daß dadurch weitere Zerlegung des Nitrates bewirkt wird, und so endlich durch die Ansammlung von Kaliumkarbonat in der Nährlösung eine alkalische Reaktion zustande kommt, die gegebenenfalls die Aufnahme bestimmter Nährstoffe erschweren kann. Wie Ruhland [1] hervorhebt, ist eine genauere experimentelle Durcharbeitung dieser Fragen erwünscht. Es sei noch erwähnt, daß auch innerhalb der Pflanze Ammonsalze physiologisch sauer wirken können, ebenso wie Nitrate im Innern der Pflanze physiologisch alkalisch. Im ersteren Fall kann mit mehr und mehr fortschreitender Säuerung des Zellsaftes die weitere Verarbeitung von Ammonsalzen endlich unmöglich gemacht werden, im letzteren Fall bildet die Pflanze, anstatt die Atmung bis zur Bildung von Kohlensäure zu treiben, organische Säuren, welche die bei der Salpeterassimilation frei werdende Base binden, so daß organisch saure Salze im Zellsaft, als Turgorstoffe wirksam, auftreten oder auch in unlöslicher Form, meistens als oxalsaurer Kalk niedergeschlagen und dem Stoffwechsel entrissen werden, bis die Pflanze, etwa infolge von Kalkhunger, sie wieder in Lösung bringt. Derartige Erfahrungen zeigen, daß bei der Frage nach der größeren Eignung des Ammon- oder Salpeterstickstoffs nicht nur die Bindungsform des Stickstoffs im Molekül des Nahrungsstoffes, sondern auch sekundäre Erscheinungen des Stoffwechsels bedeutungsvoll sein können.

Die Erscheinung, daß Ammonsalze physiologisch sauer, Nitrate aber alkalisch sind, läßt sich besonders hübsch an Kulturen des Aspergillus niger nachweisen, welcher Pilz bei Zufuhr von Nitraten massenhaft

Oxalat zur Bindung der frei werdenden Base des Nitrats bildet, während bei Darbietung von Ammonsalzen keine derartigen Bedingungen für Oxalatbildung geschaffen werden. Auch an höheren Pflanzen (Mais, Buchweizen) läßt sich ähnliches erweisen. — Soweit die Aufnahme anorganischer Stickstoffverbindungen.

Was die Resorption von organischen Stickstoffverbindungen angeht, so können wir auf die Artikel „Saprophyten“, „Parasiten“ und „Bakterien. Physiologie“ verweisen. Hier sei nur daran erinnert, daß man zwar bei Pilzen und Bakterien eine ununterbrochene Stufenleiter findet, welche führt von verhältnismäßig anspruchslosen zu den anspruchvollsten Stickstoffzehrern, welche Eiweißkörper benötigen, daß wir aber im übrigen meist keine allzustrenge Spezialisierung finden, indem die meisten zwar die eine oder andere Stickstoffquelle bevorzugen, sich aber doch auch bei Zufuhr anderer Stickstoffverbindungen züchten lassen. Für viele Schimmelpilze ist ermittelt, daß sie ganz besonders gut bei Ernährung mit Aminosäuren gedeihen, das wurde festgestellt einmal dadurch, daß man bei Darbietung bestimmter Aminosäuren das höchste Erntegewicht erhielt, sodann neuerdings von Puriewitsch dadurch, daß er fand, daß bei Zufuhr der besagten Säuren als Stickstoffquellen eine geringere Menge Material veratmet zu werden braucht zur Erzielung desselben Erntegewichts, wie bei der Ernährung mit jeder anderen Stickstoffverbindung. Zu erinnern ist noch daran, daß derartige Stickstoffverbindungen fast nie als solche dem Aufbau dienen, vielmehr erst einer Spaltung unterliegen und dann die Assimilation des Stickstoffs von dem abgespaltenen Ammon ausgeht. Nach Ehrlich und Jacobsen bauen wilde Hefen, Dematium u. a. und Kulturhefen die Aminosäuren behufs Assimilation des Ammons zu den nächst niederen Alkoholen ab; Oidium lactis bildet die entsprechenden Alkoholsäuren und es erscheint nur wenig Alkohol; Monilia bildet neben den Alkoholsäuren auch Alkohole. Ehrlich und Pistschimuka finden, daß primäre Amine unter Abspaltung von Ammoniak zerlegt werden; das Kohlenstoffgerüst sammelt sich als Alkohol in der Nährlösung an. Was Diaminosäuren angeht, so weiß man, daß Hefen Arginin verarbeiten, und zwar enzymatisch spalten (Shiga). — Umfang und Tiefe der Spaltung hängt übrigens von den sonstigen Bedingungen ab; Gegenwart stickstofffreier Kohlenstoffverbindungen pflegt die genannten Stickstoffverbindungen zu schützen.

Im Gegensatz zu den Pilzen und Bakterien, die so mannigfache organische Stickstoffverbindungen verwerten, stehen die höheren Pflanzen, die in der Natur fast immer von anorganischen Stickstoffverbindungen leben, abgesehen von besonderen Fällen, wie den Insektivoren und einigen anderen mykotrophen Pflanzen, mit Bakterien vergesellschafteten Leguminosen usw. Darüber darf nicht vergessen werden, daß im Laboratoriumsexperiment eine Ernährung auch der höheren grünen Pflanze mit organischen Stickstoffverbindungen gelingt. So hat man in Wasserkulturen dem Wurzelsystem höherer Pflanzen mit Erfolg Aminosäuren und andere organische Stickstoffverbindungen zugeführt (vgl. z. B. Hutchinson und Miller). In anderen Versuchen hat man durch Wunden organische Stickstoffverbindungen (z. B. Asparagin) der Pflanze inkorporiert und an bestimmten Stoffwechselerscheinungen, Erhöhung des Alkaloidgehaltes, Beeinflussung der Bildung blausäurehaltiger Glukoside usw. sichergestellt, daß derart zugeführte Verbindungen dem Stoffwechsel verfallen. — Ueber die Verwertbarkeit von Kreatin und Kreatinin, welche Stoffe auch im Ackerboden den Pflanzen zur Verfügung stehen sollen, durch Weizen (vgl. Skinner).

Wir beschließen diesen kurzen Ausblick auf die Stickstoffaufnahme durch die Pflanzen mit dem Hinweis, daß für die Aufnahme des Stickstoffs durch die Holzgewächse analoges gilt wie für die des Kaliums, Calciums und der Phosphorsäure, von der oben die Rede war. Die Hölzer decken ihren Bedarf an Stickstoff nicht gleichmäßig während der ganzen Vegetationsperiode, sondern in kurzer Zeit und zwar die einzelnen Arten bald früher, bald später im Jahr. Meistens setzt die Neuaufnahme von Stickstoffverbindungen durch die Bäume aus dem Boden erst nach dem Austrieb ein, wenn also aus dem Stamm und den älteren Zweigen die gespeicherten Stickstoffverbindungen samt organischen und mineralischen Stoffen schon in die austreibende Krone ausgewandert sind und eine Erschöpfung der älteren Teile eingetreten ist. Bei der Fichte findet die hauptsächlichste Entnahme von Stickstoff aus dem Boden im Juni statt, bei der Kiefer im Juli bis Oktober, bei der Esche bis zum Juni. Bei dem letztgenannten Baum findet die Aufnahme zum Teil bereits vor dem Austrieb statt und für die Tanne ist charakteristisch, daß sie ihren gesamten Stickstoffbedarf schon vor dem Austrieb deckt (Ramann). — Bei Mangel an geeigneter Stickstoffnahrung treten oft charakteristische Form- oder sonstige Abänderungen auf; von verschiedenen Seiten wird auffallende Ueberverlängerung des Wurzelsystems, der Rhizoiden infolge von Stickstoffmangel beschrieben. Bekannt ist auch die bleiche Farbe von Algen und anderen chlorophyllhaltigen Pflanzen bei Stickstoff-

hunger. Boresch, sowie Magnus und Schindler (vgl. Schindler) wiesen nach, daß die Verfärbung von Oscillarien und anderen Cyanophyceen auf Mangel an stickstoffhaltigen Nährsalzen beruht.

16. Grundzüge des Eiweißstoffwechsels; stickstoffhaltige Endprodukte. Wir haben nun nach Erledigung der Stickstoffaufnahme noch die Grundzüge des Eiweißstoffwechsels zu behandeln; werfen wir erst einen Blick auf den Eiweißabbau, den wir unter Verweisung auf die einleitenden Ausführungen lediglich als einen Sonderfall der Mobilisierung von Reservestoffen ansehen wollen, sodann auf den Aufbau der Eiweißkörper.

Um die Abbauprodukte der Eiweißkörper zu studieren, hält man sich am besten an eiweißreiche Samen oder Früchte, deren Stoffwechsel man während der Keimung und der damit parallel gehenden Mobilisierung der Reservestoffe untersucht. Natürlich können auch alle anderen Teile einer Pflanze, Blätter usw., in denen Eiweiß gebildet oder gestapelt wird, um dann auszuwandern, als Objekte dienen. Von niederen Pflanzen sind Pilze, denen man verschiedene Eiweißkörper von außen zuführen kann, sehr geeignet. Bei der Untersuchung von Keimlingen zeigt sich nun, daß die Proteine nicht oder doch nur in Ausnahmefällen als solche wandern, sie werden vielmehr erst hydrolysiert und zwar durch Enzyme, die im ruhenden Samen im allgemeinen in Form von „Proenzymen" (Zymogenen) vorhanden sind; zuerst entstehen als Produkte einer mäßigen Hydrolyse Stoffe, die man z. B. bei keimenden Grasfrüchten untersucht und auch mit besonderem Namen belegt hat (Bynin usw.), sodann die sogenannten Albumosen und Peptone, die ebenfalls im Pflanzensamen nachgewiesen werden konnten, das sind also Gemische von Polypeptiden, sodann diese Polypeptide und hierauf durch Aufspaltung dieser letzteren die Aminosäuren, z. B. Leucin, Tyrosin, während auffallenderweise Glykokoll und Alanin bislang in Keimlingen nicht nachzuweisen waren. Außerdem zeigen sich Amide der Aminosäuren, vor allem die der Asparagin- und der Aminoglutarsäure. Endlich tritt Ammoniak auf als Folge der Desaminierung der Aminosäuren oder der Desamidierung ihrer Amide. Das Ammoniak ist besonders leicht im Stoffwechsel der Pilze als Abbauprodukt von Aminosäuren, darum auch von Proteinen nachweisbar, aber auch in Keimlingen höherer Pflanzen, ferner z. B. in Blättern die Eiweiß bei der Atmung abzubauen gezwungen sind. In Keimlingen ist nach Butkewitsch die NH^3-Ansammlung Folge der Erschöpfung an N-freien Kohlenstoffverbindungen und kann durch Traubenzuckerzufuhr gehemmt werden.

Verhindert man nun durch geeignete Kulturbedingungen, Züchtung der Keimlinge im Dunkeln und dadurch bewirkten Mangel an stickstofffreien Kohlenstoffverbindungen, den Wiederaufbau des Eiweißes aus seinen Spaltungsprodukten, so sammeln sich diese in oft gewaltiger Menge in den Pflanzen an, aber schließlich im wesentlichen nicht als Aminosäuren, sondern wie man seit der Entdeckung des „Gleis" durch Hartig weiß, vorwiegend in Form von Amiden, unter welchen Asparagin und Glutamin besonders zu nennen sind; im selben Maß als die Amidsynthese vorschreitet, schwinden die Aminosäuren. Zur Bildung des Asparagins und Glutamins reicht die Menge der bei der Eiweißspaltung auftretenden Asparagin- bezw. Aminoglutarsäure nicht aus, vielmehr muß man annehmen, daß auch andere Aminosäuren in die beiden genannten Aminosäuren verwandelt werden (z. B. Leucin durch Oxydation in Asparaginsäure), und daß diese dann amidiert werden. Uebergang von einer Aminosäure in eine andere ist bekanntlich auch im tierischen Organismus beobachtet worden. Wir haben die genannten Amide aufzufassen als Reservestoffe transitorischer Natur, dazu bestimmt, Ammoniak in einer die Pflanze nicht schädigenden Form zu stapeln; damit stimmt die Erfahrung, daß man durch Zufuhr von Ammoniumsalzen zu geeigneten Versuchsobjekten deren Asparagingehalt steigern kann, indem diese Zufuhr die Amidierung von Aminosäuren, vielleicht auch den Zusammentritt von Ammoniak und stickstofffreien Kohlenstoffverbindungen zu Asparagin bewirkt (Prianischnikow [2], P. und Schulow). Was eben für Keimlinge geschildert wurde, gilt auch für andere Objekte, z. B. blühreife Hafer- oder Bohnenpflanzen (Butkewitsch), bei welchen ebenfalls Verdunkelung Abnahme des Protein-, Zunahme des Nicht-Proteinstickstoffs bedingt, und bei welchen sich gleichfalls die Bildung des Asparagins als Folge einer an den Proteinabbau sich anschließenden synthetischen Prozesses nachweisen läßt. Ist die Bildung der genannten Amide aus Aminosäuren rein chemisch gesprochen keine abbauende, sondern eine aufbauende Tätigkeit, so kann der Physiologe auch nachweisen, daß sie an andere äußere Bedingungen geknüpft ist, als der Abbau des Eiweißes zu Aminosäuren. Dieser findet auch bei Luftabschluß statt, während die Asparaginsynthese an Sauerstoffzutritt gebunden ist. Auch sonst sind lehrreiche Erfahrungen vorhanden über die Abhängigkeit des Eiweißabbaues von den Lebensbedingungen. Bei bestimmten

Pilzen verhindert Sauerstoffmangel den weiteren Abbau von Aminosäuren zu Ammoniak. Gleiches gilt nach Butkewitsch für die NH^3-Bildung in Keimlingen, woraus dieser Forscher schließt, daß wahrscheinlich die NH^3-bildungen nicht lediglich die Folge hydrolytischer, sondern auch oxydativer Prozesse sei. Ferner zeigt sich die Regulationserscheinung, daß solche Pilze, wie der schwarze Gießkannenschimmel, welche reichlich Oxalsäure bilden, die Entgiftung des bei der Eiweißspaltung entstehenden Ammons derart vornehmen, daß sie es an Oxalsäure binden. Andere Pilze aber, die nicht zur Oxalsäurebildung befähigt sind, helfen sich so, daß sie den Eiweißabbau nicht so weit treiben, sondern wesentlich nur bis zur Stufe von Aminosäuren (Leucin, Tyrosin). Bietet man solchen aber Säuren in der Nährlösung, so bilden auch sie Ammoniak, das ihnen nun nicht mehr schädlich ist. Solche Erfahrungen lehren, wie falsch es wäre, aus dem Fehlen bestimmter Bausteine im Analysengemisch auf das Fehlen derselben in dem Eiweiß zu schließen, da regulatorische Befähigung bewirkt, daß gewisse Spaltungsprodukte sich ansammeln, andere aber sofort weiter abgebaut werden und so der Analyse sich entziehen können.

Aus dem Gesagten ergibt sich, daß das Ammon das am weitesten abgebaute stickstoffhaltige Endprodukt des Eiweißesabbaues ist. Aber nur aus Pilz- bezw. Bakterienkulturen entweicht dasselbe oft in großer Menge, so daß ein der Harnstoffbildung der Tiere analoger Vorgang resultiert, von höheren Pflanzen aber wird es zum Wiederaufbau der Proteine in haushälterischer Weise zurückgehalten in Form von Amiden. — Eine weitere Oxydation des Ammonstickstoffs findet bekanntlich in höheren Pilzen und Pflanzen überhaupt nicht statt, alle zuverlässigen Beobachtungen haben vielmehr bis jetzt ergeben, daß die Verbrennung des Ammons zu salpetriger und Salpetersäure das Vorrecht ausschließlich der Nitrifikationsbakterien ist.

Ehe wir uns dem Eiweißaufbau zuwenden noch ein Wort über den Abbau von Nukleoproteiden. Auch diese werden bei der Keimung von Samen und Früchten zerlegt, sind aber im allgemeinen „stabiler" (Zaleski [2]) als die echten Proteide, so daß, wie angegeben wird, ein wesentlicher Abbau erst im Hungerzustand, eventuell sogar erst in abgetöteten Organen durch Enzymwirkung stattfindet. Der Abbau ist zu erkennen an dem Auftreten der charakteristischen Spaltungsprodukte Adenin (z. B. im Bambus, Totani) und Guanin, die ihrerseits Xanthin und Hypoxanthin liefern können. Daß phosphorhaltige Eiweißstoffe (Nukleo- oder Phosphorproteide) während der Keimung zerlegt werden, kann man an deren Schwinden und dem Auftreten anorganischer Phosphate feststellen.

Gehen wir nun über zum Aufbau der Eiweißkörper aus den Nährstoffen, so haben wir vorhin gehört, daß im Gegensatz zum Abbau, der mit Ammoniakbildung abschließt, nicht nur Ammoniak, sondern auch salpetrige und Salpetersäure, sodann in bestimmten Fällen auch freier Stickstoff in Betracht kommt, ferner organische Stickstoffverbindungen, die aber wohl allgemein unter Ammoniakabspaltung zerlegt werden, so daß in diesen Fällen ebenfalls Ammon als Ausgangsmaterial in Frage kommt. Ueber die Assimilation des freien Stickstoffs ist vorhin schon einiges mitgeteilt, vgl. auch den Artikel „Stickstoffbindung". Was die ersten Phasen des Eiweißaufbaues bei Zufuhr von salpetersauren Salzen, der vornehmsten Stickstoffquelle für höhere Pflanzen angeht, so rechnen alle vorhandenen Theorien damit, daß diese zuerst mindestens zum Teil reduziert werden müssen zu Ammoniak. Die Reduktion der Nitrate zu Ammoniak schlägt wohl zweifellos den Weg über die Nitrite ein; sie findet bei den höheren Pflanzen wesentlich in den Blättern statt. Es ist also ersichtlich, daß vorläufig der Kernpunkt der ganzen Frage der ist, wie aus Ammoniak Eiweißkörper gebildet werden.

Wie entsteht nun aus Ammoniak Eiweiß? (vgl. die Literatur bei Euler und Trier). O. Loew nimmt an, daß aus vier Molekülen Formaldehyd, der bei der Photosynthese entstehen soll, und einem Mol. Ammoniak der Asparaginsäuredialdehyd entstehen soll, der eventuell als Asparagin gestapelt wird; durch weitere Kondensationen des ersteren und Sauerstoffaustritt sowie Schwefelwasserstoffeintritt soll endlich „Protein" entstehen. Aminoaldehydgruppen sind nach Loew auch für die Proteine der lebenden Substanz charakteristisch; deren reduzierende Eigenschaften sollen auf solche Gruppen zurückzuführen sein. Eine Rücksichtnahme auf die verschiedenen als Eiweißspaltungsprodukte aufgefundenen Aminosäuren, die die Anschauung nahelegen, daß erst solche und durch deren Verkuppelung dann die verschiedenen Eiweißarten gebildet werden, wird bei der Loewschen Hypothese vermißt. Den neueren chemischen Anschauungen wird dagegen die Meinung von Erlenmeyer gerecht, daß die Aminosäuren durch Einwirkung von Ammoniak auf die jenen zugrunde liegenden α-Ketonsäuren entstünden. Dieser Theorie steht zwar nach Franzen die Schwierigkeit entgegen, daß bis dato in Pflanzen die genannten Ketonsäuren mit Ausnahme der dem Glykokoll zugrunde liegenden Glyoxylsäure noch nicht gefunden seien, doch ließe sich diese Schwierigkeit wohl

durch die Annahme der sofortigen Weiterverarbeitung der fraglichen Säuren heben. Auch weist Trier darauf hin, daß sich bei der alkoholischen Gärung der Aminosäuren als Intermediärprodukte Ketonsäuren und Ammoniak bilden und daß sich vielleicht in umgekehrter Weise der Aufbau der Aminosäuren aus Ammoniak und Ketonsäuren beim Eiweißaufbau vollziehen könnte.

Eine große Rolle in der botanischen Literatur spielt die besonders durch die Treubschen Untersuchungen in Schwung gebrachte Hypothese, die in der Blausäure das erste nachweisbare Assimilationsprodukt des Stickstoffs in der Pflanze, vielleicht sogar die erste organische Stickstoffverbindung, die aus der anorganischen Stickstoffnahrung gebildet werden soll, sieht. Blausäure kommt, in glucosidischer Form gebunden, bekanntlich in sehr vielen Pflanzen vor und Treub war zu seiner eben skizzierten Ansicht durch die Beobachtung gekommen, daß alle Bedingungen, welche die Eiweißbildung fördern, wie Zufuhr von Nitraten und von organischen Stoffen, sei es, daß man diese künstlich zuführt oder daß sie von der Pflanze photosynthetisch gebildet werden, auch den Blausäuregehalt steigern. Da erhebt sich nun zuerst die Frage, wie die Blausäure aus der von außen dargebotenen Stickstoffquelle gebildet wird und Treub meinte, sie entstünde aus Nitraten und organischen stickstoffreien Stoffen, eine Anschauung, die von anderen Forschern (Bach, Franzen) dahin präzisiert wird, daß es Formaldehyd sei, vermittels dessen die Pflanze das Nitrat in Cyanwasserstoff überführt. Diese Anschauung ist insofern zum mindesten nicht umfassend genug, denn wenn sie zu Recht bestünde, müßten die Pflanzen bei ausschließlicher Zufuhr von Ammon als Stickstoffquelle einen anderen Weg zur Synthese der Cyanwasserstoffsäure einschlagen als bei Zufuhr von Nitrat; auch ist darauf hinzuweisen, daß Pflanzen Blausäure bilden ohne Zufuhr einer Stickstoffquelle von außen, also offenbar aus dem Reserveeiweiß ihrer Samen, wie übrigens schon Treub bekannt war.

Wie dem auch sei, tritt man dafür ein, daß die Blausäure ein Zwischenprodukt des Eiweißaufbaues sei, so erhebt sich weiter die Frage, wie von ihr der Weg zu den Aminosäuren führt; wenn man nun annimmt, daß aus ihr zunächst freies Ammoniak gebildet wird, und dann Aminosäuren, so ist dies chemisch zwar möglich, aber wie Euler mit Recht bemerkt, stellt dann die Bildung von Blausäure einen ganz unnützen Umweg vor und es ist einfacher anzunehmen, daß die Nitrate direkt zu Ammoniak reduziert wurden, welcher dann, etwa nach dem Erlenmeyerschen Schema, mit Ketonsäuren Aminosäuren geben würde. — Eine andere Möglichkeit wäre jedoch die, daß die Aminosäurebildung aus Blausäure nach der Reaktion Streckers erfolgte, d. h. daß die Blausäure mit einem Aldehyd zu einem Oxynitril zusammentritt, welch letzteres dann durch Ammoniakzutritt und Verseifung zur Aminosäure würde. So könnte z. B. aus Cyanwasserstoff und Formaldehyd Formaldehydcyanhydrin entstehen, das dann zu Glykokoll würde. Ein Vorteil dieser Ansicht wird darin erblickt, daß nach der Streckerschen Reaktion stets α-Aminosäuren entstehen, die ja auch im Eiweiß enthalten sind. Immerhin ist wohl zu beachten, daß auch bei der Annahme der Streckerschen Reaktion die Theorie, welche Blausäure als Zwischenprodukt ansieht, nicht ohne die Bildung von Ammoniak als weiteren Zwischenprodukts auskommt; auch macht Trier (wie auch schon Franzen, der die Treubsche Hypothese zu stützen sucht) darauf aufmerksam, daß zwar das Vorhandensein von Formaldehyd in der Pflanze anzunehmen sei, daß aber die Beschaffung des Acetaldehyds (der allerdings eventuell durch Zymasewirkung aus Zucker entstehen könnte) und der höheren Aldehyde, die zur Herstellung der Aminopropionsäure usw., die viel wichtiger als das Glykokoll für den Eiweißaufbau sind, erhebliche Schwierigkeiten macht. — Es sind außerordentlich viele Ernährungsversuche gemacht worden, um die Treubsche Hypothese zu stützen. U. a. hat man versucht durch Zufuhr von Aminosäuren die Blausäurebildung zu beschränken. Eindeutige Resultate sind aber allen diesen Versuchen versagt geblieben, und so dürften wohl die meisten Forscher mit Trier u. a. der Meinung sein, daß die Blausäure nicht ein unbedingtes Zwischenprodukt des Eiweißaufbaus ist, ohne damit zu leugnen, daß Nitrilglukoside unter bestimmten Bedingungen, etwa beim Mangel zulänglicher Stickstoffzufuhr von außen zur Synthese der Proteine dienen könnten, d. h. daß sie unter Umständen eine Art von stickstoffhaltigen, transitorischen Reservestoffen darstellen dürften.

So zieht denn Trier neuerdings die Cannizarosche Reaktion herbei zur Erklärung der Entstehung der Aminosäuren aus Ammoniak. Z. B. soll der durch Aldolkondensation (vgl. den Artikel „Photosynthese") aus Formaldehyd entstehende Glykolaldehyd zerfallen in Glykol und Glykolsäure. Während sich aus Glykol durch Zutritt von Ammoniak Aminoäthylalkohol (Colamin) bilden soll, bildet sich auf gleiche Weise aus der Glykolsäure die Aminoessigsäure. Auf analoge Weise soll aus dem durch Kondensation von 3 Molekülen Formaldehyd gebildeten Glycerinaldehyd Glycerinsäure und Glycerin entstehen, aus ersterer

durch Ammoniakzutritt Serin usw. Auf solche Weise entstehen also einmal die Aminosäuren, ferner die Alkohole, die in die Konstitution der Lecithine eingehen, woraus sich das gemeinsame Vorkommen von Eiweiß und Lecithin (Stoklasa) erklären würde. Der Formaldehyd selbst würde nach der Cannizaroschen Reaktion in Methylalkohol und Ameisensäure zerfallen; der erstere kann als Baustoff bestimmter Pflanzenstoffe (z. B. Chlorophyll) dienen, die letztere kann nach Einwirkung von Ammoniak zu Blausäure werden; falls das zutrifft, wäre also deren Bildung auf einen Nebenprozeß zurückführen und sie wäre kein Zwischenprodukt bei der primären Eiweißsynthese. Wir haben hiermit in Kürze die wichtigsten chemischen Hypothesen über den Aufbau der Aminosäuren mitgeteilt. Aus diesen werden sich dann auf die seit E. Fischers Arbeiten bekannte Art und Weise die verschiedenen Polypeptide bilden; tatsächlich hat man in unreifen Samen und Früchten das Vorkommen von „Albumosen" beobachtet. Ueber Stoffwechselprozesse und Proteinbildung in reifenden Samen vgl. im übrigen Schulze und Zaleski [1]. Aus Polypeptidverkettungen entstehen dann endlich die Proteine. Ueber den Eintritt anderer Komplexe in das Eiweißmolekül ist wenig bekannt; der Schwefel ist enthalten im Cystin, das entsteht durch Zusammentritt von zwei Molekülen der Thioaminopropionsäure (Cystein).

Recht viel ist gearbeitet worden über den Einfluß äußerer Bedingungen auf die Eiweißbildung. Unter Verweisung auf die Darstellung in den Lehrbüchern, z. B. bei Euler erwähne ich hier nur soviel, daß die Eiweißbildung auch im Dunkeln stattfindet, also nicht etwa ein obligat photochemischer Prozeß ist. Das Licht steigert aber den Aufbau beträchtlich, einmal indem es Assimilate schafft. Läßt man Blätter im Dunkeln auf Nährsalzlösung schwimmen, so nimmt ihr Eiweißgehalt ab; bietet man aber gleichzeitig Zucker, so wird der Eiweißgehalt größer (Zaleski). Sodann aber wirkt, wie man angegeben findet, auch dadurch die Bestrahlung günstig auf die Proteinsynthese, daß die ultravioletten Strahlen direkt den Aufbau begünstigen. Die Reduktion der Nitrate aber wird durch Licht nicht begünstigt. — Ueber sonstige photochemische Wirkungen, die im Stoffwechsel von Bedeutung sein können, vgl. Neuberg. Es sei hier eingeschaltet, daß nach diesem Forscher verschiedene Stoffe, auch solche, die für den Stoffwechsel von Bedeutung sind, durch eine katalytische Wirkung des Lichts bei Gegenwart von Mineralstoffen abgebaut werden, und Lehmann und Ottenwälder nutzen diese Erfahrung aus, um die Einwirkung des Lichtes auf die Keimung „lichtempfindlicher" Samen als eine katalytische zu erweisen. Im übrigen hat man einen weitgehenden Parallelismus zwischen Atmung und Eiweißbildung beobachtet, künstliche Eingriffe, welche die erstere beeinflussen, wirken auf die letztere gleichsinnig. Näheres in der Literatur.

Was die Wanderungsbahnen der Eiweißkörper und ihrer Spaltungsprodukte angeht, so gelten bekanntlich die Siebröhren als ihre Leitungswege. Uebrigens wissen wir über diese Fragen auffällig wenig (vgl. Josts Vorlesungen). Auf die Frage ob die Siebröhren auch stickstofffreies Material leiten, kommen wir noch zu sprechen. Mit der Leitung solchen plastischen Materials ist die Funktion des Siebteils zweifellos nicht erschöpft, Haberlandt wies nach, daß in ihm Reizstoffe vorhanden sind, die ins Parenchym auswandernd dort Wachstumsvorgänge und die diesen zugrundeliegenden Stoffwechselprozesse auslösen.

Wir haben noch mit einigen Worten der wichtigeren stickstoffhaltigen Endprodukte des Stoffwechsels zu gedenken. Hierher wären zu rechnen vor allem das lebende Protoplasma selbst, wenn es gelänge dasselbe von den dem Stoffwechsel verfallenden Eiweißkörpern usw. scharf zu trennen, ferner u. a. die Enzyme, sodann bestimmte Farbstoffe; das Chlorophyll, das man wohl auch hierher stellt, ist allerdings nicht immer ein Endprodukt, wenn die Anschauung Stahls richtig ist, daß das Phytylchlorophyllid (im Gegensatz zu den Xanthophyllen) vor dem Blattfall in die Pflanze zurückwandert. — Zu den Endprodukten aber wären zu rechnen stickstoffhaltige Gerüststoffe, vor allem das Chitin, welches die Zellwand vieler Pilze bildet, nach neueren Untersuchungen (Viehöver) auch bei Bakterien vorkommt. — Zu nennen sind ferner die Senfölglukoside der Kreuzblütler, stickstoffhaltig im Gegensatz zu den stickstofffreien Lauchölen, aus welchen Senföl frei werden und als Schutz gegen Tiere dienen kann. Zu den berühmtesten stickstoffhaltigen Endprodukten des Stoffwechsels gehören aber die Alkaloide (vgl. Winterstein u. Trier), organische Basen, die man, wenn man den Begriff weit fassen will, mit Trier definieren kann als „Pflanzenbasen, die keine Bausteine sind". Alkaloide im engeren Sinn sind heterozyklische, meist tertiäre und meist sauerstoffhaltige Basen, welche den Pyridin-, Pyrrolidin-, Imidazol-, Chinolin- oder Isochinolinring enthalten. Sie bilden sich an Stellen eines reichlichen Eiweißstoffwechsels, und sollen aus Eiweißkörpern entstehen. Sie sind giftig und dienen vielleicht wie so viele andere Endprodukte dem Schutz gegenüber den Tieren.

Im Anschluß an die Alkaloide nennen wir, Euler folgend, die Indolderivate, dann die Alkylamine, hier am bekanntesten das Trimethylamin in Blättern und Blüten mancher „nach Heringen" riechenden Pflanzen. Zu erwähnen sind sodann quaternäre Ammoniumbasen, wie das Cholin, am bekanntesten als Bestandteil des Lecithins, sodann die, zumal in den Blättern reichlich auftretenden Betaine, Glykokollbetain, Stachydrin, Trigonellin, die nach Schulze und Trier durch Methylierung von Aminosäuren entstehen, nicht aus Proteinen, und als Endprodukte des Stoffwechsels anzusehen sind, da sie in alten Blättern, reifen Samen usw. nicht verschwinden (Literatur bei Trier). Endlich die Purinkörper, ebenfalls Endprodukte, die in eiweißreichen Organen, in denen reger Eiweißstoffwechsel stattfindet, in jugendlichen Blättern, in Nährgeweben sich finden und die oben schon als Bestandteile der Nukleinsäure genannt worden sind.

Zu erwähnen ist noch, daß nicht unbedingt alle Alkaloide als Endprodukte anzusehen sind, denn von einigen wird angegeben, daß sie der Atmung verfallen. Auch werden einige Alkaloide von Pilzen als Nährstoffe benutzt.

Schließlich sei darauf hingewiesen, daß das vorzüglichste N-haltige Endprodukt der Tiere, der Harnstoff auch bei den Pflanzen vorkommt. Daß Hefen Arginin in Harnstoff und Ornithin spalten ist schon längere Zeit bekannt (s. oben), sowie daß auch im Stoffwechsel anderer pilzlicher Wesen der Harnstoff eine Rolle spielt (vgl. den Artikel „Gärung"). Aber auch im Stoffwechsel der höheren Pflanzen ist Harnstof nachweisbar (Kiesel; dort Literatur), doch entgeht er leicht der Beobachtung, da die reichlich vorhandene Urease ihn alsbald verseift. Dieser kurze Hinweis erscheint angebracht, da nach Weyland die Rolle des Harnstoffs bei der Beurteilung des Sinnes der Mykorrhizabildung von Bedeutung ist (vgl. den Artikel „Mykorrhiza"). In Aspergillus niger ist durch Shibata Urease nachgewiesen.

17. Kohlenstoffaufnahme (mit Ausnahme der Kohlensäure). Mit der Besprechung der organischen Stickstoffverbindungen sind wir schon zur Besprechung der Aufnahme des Kohlenstoffs gelangt, welche in den bereits erwähnten Artikeln des Handbuchs; („Photosynthese", „Bakterien", „Saprophyten", „Parasiten", „Insektivoren" behandelt wird, so daß wir darauf verweisen können. Hier sei nur noch so viel erwähnt, daß höhere grüne Pflanzen, ebenso, wie man ihnen im Experiment organische Stickstoffnahrung beibringen kann, auch mit stickstofffreien organischen Kohlenstoffverbindungen gefüttert werden können, welche dann partiell oder ganz die Kohlensäure, die sie am natürlichen Standort als einzige Kohlenstoffquelle verwerten, ersetzt. So hat man (Zaleski) Erbsen unter Zufuhr von Zucker (Rohr-, Trauben-, Frucht-, Malzzucker) und Nährsalzen zu den Wurzeln gezüchtet, und dabei Eiweißbildung im Dunkeln beobachtet und analoge Versuche aus älterer und jüngerer Zeit liegen in großer Zahl vor (vgl. auch den Artikel „Photosynthese") Auch Salze organischer Säuren werden leicht aufgenommen, z. B. von Raphanus (Ravin). Nach Molliard verwertet der Rettich, Glukose und Saccharose, die Kresse nur Glukose. Sodann ist darauf hinzuweisen, daß auch am natürlichen Standort ein manchmal nicht unbeträchtlicher Teil des in der Pflanze vorkommenden Kohlenstoffs dem Boden entstammt; einmal der Kohlensäure der Bodenluft und des Bodenwassers, die allerdings im Haushalt der Landpflanze, verglichen mit dem Kohlendioxyd der Atmosphäre, kaum ins Gewicht fällt, sodann aber, falls der Boden reich an Karbonaten ist, diesen Salzen; Karbonate, etwa Calciumkarbonat, werden mit dem Transpirationsstrom in großen Mengen aufgenommen und z. B. in den Zellwänden als solche deponiert.

Auch werden, wie oben schon angedeutet, überschüssig aufgenommene Karbonate durch organische Säuren, welche die Pflanze regulatorisch bildet, zerlegt, die Base auf diese Weise gebunden, z. B. als oxalsaures Kalium oder oxalsaurer Kalk, und die Kohlensäure zur Produktion neuer organischer Substanz verwendet, ein Vorgang, bei dem allerdings für die Pflanze kein Gewinn an organischer Substanz zu verzeichnen ist.

18. Umsatz stickstofffreier Kohlenstoffverbindungen. Wir haben nun noch ein Wort über den Kohlehydratstoffwechsel und den Umsatz anderer stickstofffreier organischer Stoffe zu sagen, wobei wir uns aber auf Erwähnung einiger wichtigerer im übrigen willkürlich herausgegriffener Beispiele aus der Physiologie der höheren Pflanzen beschränken müssen.

Was zuerst die Zuckerarten angeht, die bei der Kohlensäureassimilation gebildet werden, so ist darüber der Artikel „Photosynthese" zu vergleichen. Diese Zuckerarten, von denen bekanntlich die Glukose die wichtigste Rolle im pflanzlichen Stoffwechsel spielt, können sich in Pflanzenzellen bis zu einem gewissen Grad ansammeln, dabei als Turgorstoffe dienend, bis sie anderweitig verwertet werden; eine Ansammlung von Zucker in größerer Menge, als Reservestoff ist aber nur in einer beschränkten Zahl von Fällen realisiert, so bei der Zuckerrübe; meist werden aus bekannten Gründen, um den Turgor nicht übers Maß zu steigern, die Zucker in unlöslicher Form als Stärke abgeschieden, sobald ihre Konzentration ein

gewisses Maß überschreitet. Auch andere Gründe kann die Umwandlung des Zuckers in Stärke haben, so sind bekanntlich die Wanderbahnen der Zuckerarten durch die Ablagerung von transitorischer Stärke gekennzeichnet durch deren Ausfällung zumal bei sehr reichlicher Zuckerzufuhr, das Konzentrationsgefälle in der Richtung der Wanderung erhalten wird. Ebenso kann transitorisch niedergeschlagenes Inulin die Wanderbahnen der Fruktose verraten (Grafe). Ueber Umwandlung von Zucker in Stärke infolge traumatischer Reize vgl. Ruhland [2]. Der umgekehrte Vorgang, Verzuckerung von Stärke, der dem Botaniker u. a. zumal bei der Keimung stärkehaltiger Samen vor Augen tritt, steht ferner nicht stets im Dienste der Wanderungsfähigkeit der Kohlehydrate, sondern findet z. B. häufig bei niederer Temperatur statt um einen Schutz gegen Kälte zu gewähren (Maximow). Die Ueberführung von Stärke in Zucker, die in den Stämmen der Bäume zu beobachten ist, erfolgt nach früheren Anschauungen unter dem Einfluß der Kälte, während Weber neuerdings den Einfluß der Temperatur auf die Stärkelösung in Baumstämmen leugnet. In reifenden Früchten hat die Verzuckerung der Stärke allbekannte ökologische Bedeutung.

Kennzeichnen wir nun einige Umwandlungsprozesse etwas näher, so gehen Stärke in Maltose und diese in Glukose, Rohrzucker in Glukose und Fruktose, Inulin in Fruktose über, oder umgekehrt, um nur einige der wichtigsten Fälle zu nennen. Wenn Stärke in Rohrzucker übergeht, so muß dabei auch Umwandlung von Frucht- in Traubenzucker, also Uebergang einer Aldose in eine Ketose erfolgen, Verwandlungen, welche die Pflanze offenbar nach Bedarf bewerkstelligen kann (über Abhängigkeit der Rohrzuckersynthese von der Atmung vgl. Boysen-Jensen). Natürlich entstehen auch bei der Verzuckerung der Hemizellulosen, die vielfach den Charakter von Reservestoffen haben, die ihr Molekül aufbauenden Zuckerarten, die dann weiter verarbeitet werden, so vor allen Galaktose und Mannose, seltener Glukose und Fruktose. In einigen Fällen wird auch Arabinose gebildet, also eine Pentose, welche Zuckerarten übrigens auch bei der Spaltung von Nukleinsäuren auftreten. Was die Wanderform angeht, so können alle löslichen Kohlehydrate wandern; Inulin wandert nicht als solches, sondern als Fruktose. Sehr genaue Studien über die Wanderungsform des Zuckers in der Rübe verdankt man Ruhland [2]: Der Zucker strömt wesentlich als Fruchtzucker der Wurzel zu, dort lagert sich Rohrzucker ab, als solcher wandert er im zweiten Jahr nach oben um erst in den Blättern gespalten zu werden. In den Infloreszenzachsen wandert er als Rohrzucker in die Höhe. Viel untersucht ist die Frage, in welchen Zellen der Zucker, sei es bei der Abwanderung aus den Blättern nach der Assimilation, sei es bei anderen Gelegenheiten wandert. Häufig wird die Ansicht Czapeks vertreten, so neuerdings von Simon in seinen Studien über Kautschukpflanzen, daß die Siebröhren die Wanderbahnen seien. Déléano [2] spricht die Leitbündel als solche an, ohne sich zwischen Holz und Siebteilen zu entscheiden, Schneider-Orelli die Siebteile; Ruhland [2] ist nicht der Meinung, daß den Siebröhren eine Rolle beim Zuckertransport zukomme.

Wie im Tierreich so ist auch im Pflanzenreich die Frage diskutiert worden, ob aus Eiweißkörpern Kohlehydrate entstehen können und bejaht worden auf Grund der Erfahrung, daß in jugendlichen Kartoffeln Eiweiß abgebaut wird, dafür Asparagin einerseits, Kohlehydrate andererseits sich bilden. So können jedenfalls Kohlehydrate aus den desamidierten stickstofffreien Resten von Aminosäuren entstehen. Uebrigens ist ja auch bekannt, daß Pilze bei alleiniger Zufuhr von Eiweiß aus diesem alle für ihren Stoffwechsel nötigen organischen Stoffe, also auch Kohlehydrate bilden können.

Was weitere stickstofffreie organische Stoffe angeht, so sind die organischen Pflanzensäuren mit wenigen Worten zu streifen. Solche erscheinen sehr häufig, unter Umständen transitorisch, als Folge unvollkommener Oxydation von Kohlehydraten, welche unvollkommene Oxydation allerdings keineswegs durch Sauerstoffmangel bewirkt zu werden braucht und häufig in der Ansammlung von Basen die abgesättigt werden sollen, ihre Ursache hat. Auf diese Weise entstehen die Salze organischer Säuren, die so häufig im gelösten Zustand als Turgorstoffe dienen oder auch, meist als oxalsaurer Kalk, im festen Zustand abgeschieden werden und als Schutzmittel gegen Tiere Bedeutung für die Pflanze haben können. Interessant ist die Angabe, daß unter Umständen oxalsaurer Kalk durch Säuerung des Zellsaftes in Lösung überführt und so behufs regulatorischer Turgorsteigerung verwertet werden kann. Ueber Säurebildung bei den Sukkulenten vgl. den Artikel „Photosynthese". Gehen Pflanzensäuren, wie eben erwähnt, im Stoffwechsel aus Zuckern hervor, so können sie in anderen Fällen auch umgekehrt die Muttersubstanzen für jene werden.

Euler folgend erwähnen wir sodann das Vorkommen von Mesoxalsäure, die Oxalsäure und ferner Glyoxylsäure liefern kann, welch letztere ihrerseits Glykol- und Oxalsäure liefert. Oxalsäure kann Ameisensäure bilden, woraus die Möglichkeit einer gene-

tischen Verknüpfung all dieser Säuren erhellt. Auch aus Aldehyden, die bei der Zerlegung oder beim Aufbau des Zuckers entstehen, könnten sich nach Euler Pflanzensäuren bilden, so etwa Zitronensäure aus drei Mol. Acetaldehyd, oder aus Glykolaldehyd und auf solche Weise ließe sich nicht nur die Bildung von Säuren mit einfacher sondern auch solcher mit verzweigter Kohlenstoffkette, wie die eben genannte Zitronensäure, auf einheitliche Weise erklären. Ueber flüchtige Säuren aus grünen Blättern berichten Curtius und Franzen. An die bedeutende Rolle der Pflanzensäuren im Stoffwechsel der Pilze kann hier nur erinnert werden. — Ein weiteres außerordentlich wichtiges Glied im Stoffwechsel der Pflanzen stellen bekanntlich die fetten Oele vor. Bekanntlich treten solche im Fruchtfleisch häufig als Endprodukte auf (Olive u. a.), doch zumal der Uebergang von Fett in Kohlehydrate und umgekehrt ist häufig diskutiert worden, seitdem Pfeffer ihn sicher festgestellt hatte. Bekanntlich bildet sich Zucker oder Stärke aus Oel beim Keimen fetthaltiger Samen und Früchte und der umgekehrte Vorgang, Schwund der transitorisch in Axenorganen deponierten Stärke und ihre Ueberführung in Zucker, der das Material zur Oelsynthese liefert, ist beim Reifen solcher Samen zu beobachten. Es ist möglich, daß das Glyzerin des Fettes aus Glycerose oder aus Dioxyaceton durch Reduktion entsteht, während „der Aufbau der höheren Fettsäuren als wiederholte Kondensation zwischen Bruchstücken von Zuckermolekülen aufzufassen sein dürfte" (Euler). Iwanow findet, daß im reifenden Samen zuerst gesättigte, aus diesen dann ungesättigte Fettsäuren entstehen. Bei der Mobilisierung des Fettes wird es hydrolysiert, das Glyzerin sofort verarbeitet, die Fettsäuren endlich oxydiert. — In keimenden Zichorienfrüchten geht Fett in Inulin über (Grafe und Vouk). Das als Reservestoff in Baumstämmen sich zeigende Fett ließ man früher ebenfalls aus Stärke, bezw. Zucker hervorgehen, während man neuerdings andere Muttersubstanzen dafür annimmt, z. B. mit Vorbehalt Pentosane; nach Weber ist im Gegensatz zu früheren Anschauungen, Fettbildung wie -Lösung in den Bäumen unabhängig von der Temperatur, Fett bildet sich in „Fettbäumen" gleichzeitig mit Stärke; Fichte und Tanne haben ihr Fettmaximum im Sommer, sodaß jedenfalls die Fettbildung nicht einen Schutz gegen Kälte darstellt. Ueber Umwandlung von Fetten in Kohlehydrate vgl. ferner Iwanow, S. und Miller, E. C.

Ueber Umwandlung von Alkoholen (Glycerin, Adonit, Sorbit [Treboux] usw.) in Stärke vgl. den Artikel „Photosynthese". Ueber den Kohlehydratstoffwechsel des Pollens ist Tischler zu vergleichen. Ueber das Vorkommen und die viel umstrittene Rolle von Aldehyden in grünen Pflanzen vgl. Curtius und Franzen, die auch über flüchtige Alkohole in grünen Blättern berichten (vgl. auch den Artikel „Photosynthese").

Werfen wir noch einen Blick auf die organischen Stoffe, welche als stickstofffreie Endprodukte des pflanzlichen Stoffwechsels zu gelten haben, so sind hier zuerst zu nennen die Gerüststoffe, Zellulose, Hemizellulosen, Pentosane, Pektine, soweit sie nicht als Reservestoffe fungieren; sie verfallen erst nach dem Tod der höheren Pflanzen dem Stoffwechsel von Bakterien und Pilzen. Gleiches gilt für verholzte und verkorkte Wandsubstanzen. Ferner sind als Endprodukte anzusehen gewisse Glykoside: die Bildung mancher Glykoside wird als Entgiftungsreaktion aufgefaßt, so wird die Arbutinbildung derart gedeutet, daß durch Verkettung des giftigen p-Dioxybenzols mit Zucker jenes entgiftet werden soll. Manche andere Glykoside werden nicht als Endprodukte des Stoffwechsels aufgefaßt, sondern als Reservestoffe, in welchen der Zucker in einer das Protoplasma nicht diosmierenden Form aufgestapelt werden soll, hierher rechnet das Salizin. Auch Schutzfunktion wird manchen Glykosiden zugeschrieben, wie oben schon für die stickstoffhaltigen Senfölglukoside erwähnt worden ist. Als Endprodukte sind ferner verschiedene Farbstoffe zu nennen, die übrigens den mannigfachsten Funktionen dienen und den verschiedensten organischen Körperklassen zuzurechnen sind; wir beschränken uns darauf, zu erwähnen, daß die Anthokyane vielleicht Gerbstoffglykoside sind. Man findet, daß Kälte ihre Bildung fördert und daß sie infolge ihrer Wärmeabsorption die Pflanze schützen; Zuckerzufuhr befördert ihre Bildung. Auch andere Gerbstoffe sind wie bekannt in den Pflanzen allverbreitet und ihre Bildung ist ebenfalls an Zuckerzufuhr gebunden. Entweder sind sie wertlose Endprodukte oder auch als Schutzmittel gegen Tiere anzusehen. Nathansohn weist darauf hin, daß sie vielleicht auch bei der Stoffspeicherung eine Rolle spielen können, indem sie andere Stoffe an sich binden. Eine bekannte auf Pfeffer zurückzuführende Beobachtung lehrt bekanntlich, daß Methylenblau durch Gerbstoff in der lebenden Zelle gespeichert wird und solches könnte auch für andere Stoffe, z. B. Nährstoffe gelten. — In Früchten (Mispeln, Schleben usw.) fungiert Gerbstoff nicht als Endprodukt des Stoffwechsels, sondern wird veratmet (vgl. auch Lloyd). — Auf Endprodukte aus der Gruppe der Terpene kann hier nicht eingegangen werden, auch über die Chemie des

Milchsaftes genüge es auf Euler zu verweisen. In biologischer Beziehung ist nach wie vor die Annahme am wahrscheinlichsten, daß der Milchsaft Schutzfunktion gegen Tierfraß hat.

19. Technik von Ernährungsversuchen. Wir wollen mit einigen Bemerkungen über die Kechnik von Ernährungsversuchen schließen. Betreffs der Technik von Stoffwechselversuchen sei auf die Literatur, z. B. auf Abderhaldens Handbuch verwiesen.

Bei Versuchen, den Bedarf der Pflanzen an Nährstoffen zu ermitteln, können als Nährböden natürlich nicht Böden von ziemlich ungenau bekannter Zusammensetzung, wie Humusböden, für höhere Pflanzen, Kartoffel oder Möhrenscheiben, Malzextraktlösungen, Heuinfusionen, Fleischwasser usw. für Pilze und Bakterien in Verwendung kommen, obwohl auf solchen das Wachstum oft besonders befriedigend ist und sie darum für reizphysiologische Versuche mit Vorliebe und Berechtigung Verwendung finden, vielmehr Nährböden bezw. Nährlösungen, die aus genau bekannten reinen Stoffen synthetisch dargestellt werden, soweit das wenigstens möglich ist. Bei sehr anspruchsvollen Formen, welche z. B. Eiweiß bedürfen, ist dieser Forderung in vielen Fällen noch nicht Genüge geleistet worden.

Besonders zu achten ist auch auf die vollkommene Reinheit des zur Lösung verwendeten destillierten Wassers, sodann mehr als es meistens geschieht auf die Zusammensetzung der Luft, welche Zutritt zu den Kulturen hat. Wird neuerdings in der Reizphysiologie mit vollem Recht darauf geachtet, daß die verunreinigte Laboratoriumsluft nicht störend wirkt, so muß mehr als bisher geschehen auch für Reinheit der Luft in den Kulturräumen mit konstanter Temperatur, in den Thermostaten usw. gesorgt werden. Zumal bei Versuchen, in welchen die Befähigung zur Assimilation des freien Stickstoffs untersucht werden soll, ist peinlich darauf zu achten, daß die in der Luft nie fehlenden Stickstoffverbindungen zu den Kulturen keinen Zutritt haben; auch sind flüchtige Stoffe in der unreinen Luft vorhanden, die als Kohlenstoffquelle dienen und zur Fehlerquelle werden können, es sei denn, daß die Luft sorgfältig von ihnen befreit wird, ehe sie zu den Versuchsobjekten gelangt. Im übrigen würde es viel zu weit führen, hier irgendwelche Einzelheiten zu bringen, es sei verwiesen auf das Buch von Küster über die Kultur der Mikroorganismen, soweit solche in Frage kommen. Für Algenkulturen sind zumal die neuen Arbeiten von E. Pringsheim zu vergleichen.

Bei Versuchen über den Bedarf der Blütenpflanzen an Nährsalzen spielt die sogenannte „Wasserkultur" derselben, richtig Nährsalzlösungskultur, eine große Rolle, bei welcher das Wurzelsystem statt im Boden zu wachsen in eine verdünnte Lösung von Nährsalzen taucht. Die Zusammensetzung der Nährlösung ist natürlich den Versuchspflanzen und dem Versuchszweck anzupassen. Sehr gute Resultate gibt die Verwendung der Knoopschen Nährlösung; sie enthält:

1,3 g Calciumnitrat
0,33 g Kaliumnitrat
0,33 g prim. Kaliumphosphat
0,16 g Kaliumchlorid (kann wegbleiben)
0,33 g Magnesiumsulfat, sowie einen Tropfen off. Eisenchloridlösung im Liter Wasser. Man läßt die Samen der Versuchspflanzen keimen und züchtet die Keimlinge zunächst einige Zeit, etwa eine Woche, zwischen feuchtem Fließpapier, dann bietet man ihren Wurzeln die Nährlösung. Nach einigen Wochen ersetzt man die Nährlösung durch neue Nährlösung, der man nunmehr etwa doppelt bis viermal so viel Eisenchlorid zuführt, und erhält so freudig wachsende Pflanzen. Die Kritik, die v. d. Crone an dieser Lösung übte, erscheint nicht stichhaltig. Doch hat dieser Forscher das Verdienst, eine andere Nährlösung angegeben zu haben, welche zwar nach einigen beiläufigen Erfahrungen des Verf. nicht immer, aber jedenfalls wohl in der Mehrzahl der Fälle ebenfalls sehr gute Resultate gibt. Wie eine von Sachs empfohlene Nährlösung enthält sie nur schwer lösliche Phosphate, und zwar Kalk- und Ferrophosphat (nicht Ferriphosphat) je 0,25 g, außerdem Kaliumnitrat 1 g, und Magnesiumsulfat sowie Calciumsulfat je 0,5 g im Liter, also keine Alkaliphosphate. Sorgt man durch Umrühren des Bodensatzes dafür, daß die Wurzeln dauernd mit den schwer löslichen Salzen in Kontakt bleiben, so wachsen die Pflanzen in ihr sehr gut, sind gedrungener als die in der Knoopschen Lösung wachsenden, und zeigen im Gegensatz zu diesen, die freudig grün erscheinen, eine dunkelgrüne, oft fast blaugrüne Farbe. Die Lösung hat den Vorteil, daß sie auch Ungeübten die richtige Dosierung des Eisens erlaubt, weil dieses stets in überschüssiger Menge als schwer lösliches Salz vorhanden ist. Neue systematische Versuche mit solchen und ähnlichen Nährsalzlösungen sind erwünscht. — Versuche über die Notwendigkeit der einzelnen Stoffe werden derart angestellt, daß bestimmte Salze aus den vollständigen Nährlösungen weggelassen und durch andere ersetzt werden. — Vielfach, besonders in landwirtschaftlichen Kreisen tritt an Stelle dieser Wasserkultur die sogenannte Sandkultur, bei welcher die Pflanzen in reinem Quarzsand gezogen werden, welchem die nötigen Nährsalze beigefügt werden. Eine

bessere Luftzufuhr zum Wurzelsystem ist der wesentlichste Vorteil dieser Methode.

Wenn wir oben betont haben, daß sorgsame Reinigung und Reinhaltung des Wassers, der Luft und der Nährstoffe eine unerläßliche Vorbedingung zur Erhaltung brauchbarer Ergebnisse von Ernährungsversuchen ist, so gilt nicht minder, daß die Versuchspflanzen und Nährböden auch von anderen Organismen frei gehalten werden müssen, (es sei denn, daß man eben die gegenseitige Beeinflussung verschiedener Organismen studieren will), d. h. daß Reinkulturen, genauer gesagt Einzellkulturen zu verwenden sind; m. a. W.: sämtliche Zellen, die in Kulturen, welche vergleichbare Resultate ergeben sollen, sollen, wenn irgend möglich, von einer einzigen Mutterzelle abstammen. Diese Forderung wird für Pilz- und Bakterienkulturen fast allgemein als berechtigt anerkannt, auch für Algenkulturen, sollte aber künftig noch mehr als bisher auch bei der Züchtung von Blütenpflanzen in Wasser- oder Sandkultur Berücksichtigung finden. Soweit als es möglich ist, sollten auch hier die verschiedenen Versuche einer Versuchsserie immer mit „reinen Linien" anstatt mit „Populationen" angestellt werden und es sollte durch Sterilisation der Samen sowie der Nährsalzlösungen dafür gesorgt werden, daß fremde Organismen sich nicht einschleichen können. Reichliches Wachstum von Bakterien auf der absterbenden Oberfläche der Wurzelspitzen kann die Resultate von Wasserkulturversuchen erheblich trüben. Eine dauernde Freihaltung der Kulturen höherer Pflanzen von Mikroorganismen ist freilich nicht ganz leicht; Beiträge zur Methodik liefert neuerdings Schulow.

Literatur. *1. Hand- und Lehrbücher:* **E. Abderhalden,** *Handbuch der biochemischen Arbeitsmethoden.* — **F. Czapek,** *Biochemie der Pflanzen, Bd.* **1** *und* **2**, *1904 und 1905.* — **H. Euler,** *Grundlagen und Ergebnisse der Pflanzenchemie, Bd.* **1** *bis* **3**, *1908 und 1909.* — **L. Jost,** *Vorlesungen über Pflanzenphysiologie, 2. Aufl., 1908.* — **E. Küster,** *Kultur der Mikroorganismen, 2. Aufl., 1913.* — **A. Nathansohn,** *Der Stoffwechsel der Pflanzen, 1910.* — **C. Oppenheimer,** *Grundriß der Biochemie, Leipzig 1912.* — **W. Palladin,** *Pflanzenphysiologie 1911.* — **W. Pfeffer,** *Pflanzenphysiologie, Bd.* **1**, *1897.* — **E. Ramann,** *Bodenkunde 1911.*

2. Abhandlungen: **U. Abshagen,** *Diss. Kiel, 1912.* — **J. A. Aberson,** *Jahrb. f. wiss. Bot., 1909, Bd.* **47**, *S. 41.* — **E. Bachmann,** *Ber. d. d. Bot. Ges., 1911, Bd.* **29**, *S. 261.* — **K. Bassalik,** *Ztschr. f. Gärphys., 1912, Bd.* **2**, *S. 1 u. 1913, Bd.* **3**, *S. 15.* — **L. M. Blackledge,** *Ann. of Bot., 1913, Bd.* **27**, *S. 168.* — **E. Blanck,** *Journ. f. Landw., 1913, Bd.* **61**, *S. 1.* — **K. Boresch,** *Jahrb. f. wiss. Bot. 1913, Bd.* **52**, *S. 175.* — **P. Boysen-Jensen,** *Bioch. Ztschr., 1912, Bd.* **40**, *S. 420.* — **Widm. Brenner,** *Ber. d. d. bot. Ges., 1911, Bd.* **29**, *S. 479.* — **W. Butkewitsch,** *Bioch. Ztschr., 1908, Bd.* **12**, *S. 314.* — **Derselbe,** *eod. loco, 1909, Bd.* **16**, *S. 411.* — **Derselbe,** *Z. f. physiol. Chemie, 1909, Bd.* **63**, *S. 103.* — **Th. Curtius und H. Franzen,** *Sitzber. Heidelberg. Ak. math. nat. Kl., 1912. 1., 7., 8. und 9. Abh. und Ann. d. Chemie, 1912, Bd.* **39**, *S. 89.* — **N. I. Déléano,** *Inst. bot. univ. d. Genève, 1907, 1 u. 1908 1.* — **Derselbe,** *eod. loco, 1911, Bd.* **49**, *S. 129.* — **Derselbe,** *Jahrb. f. wiss. Bot., 1912, Bd.* **51**, *S. 541.* — **F. Ehrlich und K. C. Jacobsen,** *Ber. d. chem. Ges., 1911, Bd.* **44**, *S. 888.* — **F. Ehrlich und P. Pistschimuko,** *eod. loco, 1912, Bd.* **45**, *S. 1006.* — **F. C. Faber, v.,** *Jahrb. f. wiss. Bot., 1912, Bd.* **51**, *S. 285.* — **J. Fitting,** *Ztschr. f. Bot., 1911, Bd.* **3**, *S. 209.* — **M. Fluri,** *Flora, 1908, Bd.* **99**, *S. 81.* — **H. Franzen,** *Sitzber. Heidelberg. Ak. math. nat. Kl., 1910, 9. Abh.* — **V. Grafe und V. Vouk,** *Bioch. Ztschr., 1912, Bd.* **43**, *S. 424.* — **G. Haberlandt,** *Sitzber., K. ak. Wiss., phys. math. Kl., Berlin 1913, Bd.* **16**, *S. 318.* — **H. B. Hutchinson und N. H. J. Miller,** *Bakt. Centralbl., 2. Abt., 1911, Bd.* **30**, *S. 513.* — **S. Iwanow,** *Beih. z. Bot. Centralbl., 1912, Bd.* **28**, *S. 159.* — **M. A. Jegoroff,** *Ztschr. f. Physiol. Chemie, 1912, Bd* **82**, *S. 231.* — **F. Keil,** *Cohns Beitr. z. Biol., 1912, Bd.* **11**, *S. 335.* — **A. Kiesel,** *Ztschr. f. Physiol. Chemie, 1911, Bd.* **75**, *S. 169.* — **L. Kolderup-Rosenvinge,** *Biol. Arb. t. E. Warming, 1911, S. 203.* — **W. Kübler,** *Nat. Ztschr. f. Land- und Forstwirtsch., 1912, Bd.* **10**, *S. 161.* — **A. Kossowicz,** *Ztschr. f. Gärphys., 1912, Bd.* **1**, *S. 253.* — **E. Lehmann und A. Ottenwälder,** *Ztschr. f. Bot., 1913, Bd.* **5**, *S. 337.* — **R. Lieske,** *Jahrb. f. wiss. Bot., 1911, Bd.* **50**, *S. 328.* — **F. E. Lloyd,** *Ztschr. f. Chemie der Kolloide, 1911, Bd.* **9**, *S. 65.* — **O. Loew,** *Bioch. Ztschr., 1912, Bd.* **41**, *S. 224.* — **W. Magnus und B. Schindler,** *Ber. d. bot. Ges., 1913, Bd.* **30**, *S. 314.* — **R. Marloth,** *Flora des Kaplands, 1908.* — **Derselbe,** *Trans. royal soc., S. Afr., 1910, S. 429.* — **N. A. Maximow,** *Ber. d. bot. Ges., 1912, Bd.* **30**, *S. 52 und 504.* — **P. Mazé,** *Comptes rendues, 1911, Bd.* **153**, *S. 902.* — **Derselbe,** *Ann. de l'inst. Pasteur, 1912, Bd.* **25**, *S. 706.* — **E. C. Miller,** *Ann. of bot., 1912, Bd.* **26**, *S. 889.* — **M. Molliard,** *Bull soc. bot. France, 1909, Bd.* **56**, *S. 382.* — **C. Neuberg,** *Bioch. Ztschr., 1908, Bd.* **13**, *S. 305.* — **A. Oes,** *Zeitschr. f. Bot., 1913, Bd.* **5**, *S. 145.* — **D. Prianischnikow,** *Die landw. Versuchsstat., 1911, Bd.* **75**, *S. 357.* — **Derselbe,** *Rev. gén. de Bot., 1913, Bd.* **25**, *S. 5.* — **D. Prianischnikow und J. Schulow,** *Ber. d. d. bot. Ges., 1910, Bd.* **28**, *S. 253.* — **Th. Pfeiffer und E. Blanck,** *Die landw. Versuchstat., 1912, Bd.* **77**, *S. 217.* — **E. Pringsheim,** *Cohns Beitr. z. Biol. d. Pflanzen, 1912, Bd.* **11**, *S. 305 u. 1913, Bd.* **12**, *S. 1 u. 49.* — **E. Ramann und W. Bauer,** *Jahrb. f. wiss. Bot., 1912, Bd.* **50**, *S. 67 und 848.* — **E. Ramann,** *Jahrb. f. wiss. Bot., 1911, Bd.* **50**, *S. 84.* — **Derselbe,** *Die landw. Versuchsstat., 1912, Bd.* **76**, *S. 157.* — **G. E. Ritter,** *Ber. d. d. bot. Ges., 1911, Bd.* **29**, *S. 570.* — **W. Ruhland,** *Zeitschr. f. Bot., 1909, Bd.* **1**, *S. 747.* — **Derselbe,** *Jahrb. f. wiss. Bot., 1911, Bd.* **50**, *S. 200.* — **Schneider-Orelli,** *Bakt. Zentralbl. II, 1909, Bd.* **24**, *S. 158.* — **S. Schönland,** *Trans. royal*

soc. S. Afr., 1910, S. 395. — **B. Schindler**, *Zeitschr. f. Bot. 1913, Bd.* 5, *S. 497.* — **J. Schulow**, *Ber. d. bot. Ges., 1911, Bd.* 29, *S. 504.* — **O. Schreiner und X. Sullivan**, *Bot. Gaz., 1911, Bd.* 51, *S. 121 und 273.* — **E. Schulze**, *Ztschr. f. physiol. Chemie, 1911, Bd.* 71, *S. 31.* — **E. Schulze und U. Pfenninger**, *Ztschr. f. physiol. Chemie, 1910, Bd.* 68, *S. 93 und 1910, Bd.* 69, *S. 366.* — **E. Schulze und G. Trier**, *Ztschr. f. physiol. Chemie, 1912, Bd.* 76, *S. 258.* — **J. Scûcs**, *Jahrb. f. wiss. Bot., 1912, Bd.* 52, *S. 85.* — **S. Simon**, *Tropenpflanzer, 1913, Bd.* 17. — **G. Stahel**, *Jahrb. f. wiss. Bot., 1911, Bd.* 49, *S. 579.* — **F. W. Sieber**, *Verh. med. phys. Ges. Würzburg, 1912, S.* 41. — **J. J. Skinner**, *Bot. Gaz., 1912, Bd.* 54, *S. 152.* — **G. Tischler**, *Jahrb. f. wiss. Bot., 1910, Bd.* 47, *S. 219.* — **G. Totani**, *Ztschr. f. physiol. Chemie, Bd.* 62, *S. 113.* — **O. Treboux**, *Ber. d. d. bot. Ges., 1909, Bd.* 27, *S. 428 und 507.* — **G. Trier**, *Die einfachen Pflanzenbasen, Berlin 1912.* — **R. H. True und H. H. Bartlett**, *U. S. dep of agric. bur, plant ind. 1912, Bull. No. 231, S. 1.* — **A. Viehöver**, *Ber. d. bot. Ges., 1912, Bd.* 30, *S. 443.* — **Th. Weevers**, *Rec. d. trav, bot. Neerland., 1911, Bd.* 8, *S. 289.* — **F. Weber**, *Sitzber. Wiener Ak. math. nat. Kl., I. Abt., 1909, Bd.* 118, *S. 1.* — **J. R. Weir**, *Flora, 1911, Bd.* 103, *S. 87.* — **H. Weyland**, *Jb. f. wiss. Bot., 1912 Bd.* 51, *S. 1.* — **A. Wieler**, *Ber. d. d. bot. Ges., 1912, Bd.* 30, *S. 394.* — **Derselbe**, *Die Pflanze und der Kalk, Berlin 1913.* — **W. Zaleski**, *Beih. z. Bot. Centralbl., 1911, Bd.* 27, *I, S. 63.* — **Derselbe**, *Ber. d. bot. Ges., 1911, Bd.* 29, *S. 146.* — **W. Zaleski und Taterski**, *Bioch. Ztschr., 1912, Bd.* 43, *S. 7.*

W. Benecke.

Stohmann
Friedrich.

Geboren am 25. April 1832 in Bremen. Er war nach seinen Studien in Göttingen Assistent von Graham in London, wo er zur Erwerbung von Kenntnissen und Erfahrungen im chemisch-technologischen Gebiete reiche Gelegenheit fand. Bald wandte er sich als Assistent Hennebergs, dann seit 1862 als Leiter der Braunschweigischen Versuchsstation der Agrikulturchemie zu, war noch einige Jahre in Halle, zuletzt bis zu seinem Tode (am 1. November 1897) in Leipzig als Professor tätig. Seine Untersuchungen umfaßten weite Gebiete der Agrikulturchemie und förderten nachhaltig die Kenntnis der chemischen Bodenverhältnisse, der Pflanzenernährung (namentlich für die Rübenkultur), auch der rationellen Ernährung der Nutztiere. Während der letzten 18 Jahre seines Lebens beschäftigte ihn das wichtige Problem, die Wärmewerte von Nahrungsmitteln festzustellen. Um diese Aufgabe zu lösen, bedurfte es umfassender Vorarbeiten, die der Ausbildung einer sicheren Methode galten, um die Verbrennungswärme einfacher wie komplizierter organischer Verbindungen genau zu ermitteln. Seine thermochemischen Arbeiten, die im Journ. f. pr. Chemie erschienen, können neben denen von J. Thomsen und Berthelot als klassisch gelten.

Seine von größter Arbeitskraft zeugenden literarischen Leistungen sind in mehreren technologischen Werken niedergelegt, besonders im Handbuch der Zuckerfabrikation und in dem Enzyklopädischen Handbuch der technischen Chemie (ursprünglich von Muspratt herausgegeben). Seine landwirtschaftlich-chemischen Untersuchungen sind in mehreren Werken und in verschiedenen Zeitschriften veröffentlicht.

Literatur. ***Poggendorffs*** *biographisches Lexikon Band* 2, *Seite 1017 u. a.*

E. von Meyer.

Stokes
George Gabriel.

Geboren am 13. August 1819 in Skreen, Irland, gestorben am 2. Februar 1903 in Cambridge. Er studierte in Cambridge und wurde 1849 zum Lucasion-Professor der Mathematik in Cambridge ernannt; gleichzeitig hielt er Vorlesungen über Physik am Museum für praktische Geologie in London. Von 1854 bis 1885 war Stokes Sekretär, von 1885 bis 1890 Präsident der Royal Society. Stokes' Untersuchungen liegen vorwiegend auf dem Gebiet der Hydrodynamik, Akustik, Optik. Die Hydrodynamik erfuhr durch ihn weitgehende Förderung, ebenso sind seine Arbeiten über Aberration und Beugung grundlegend. Als erster erkannte er die Natur der Fluoreszenz; 1852 veröffentlichte er grundlegende Untersuchungen darüber und formulierte das unter seinem Namen bekannte Gesetz der Fluoreszenz. Seine Veröffentlichungen zeichnen sich durch souveräne Beherrschung des Materials, weite Ausblicke und klare Darstellung aus.

Literatur. ***W. Voigt***, *G. G. St. Gött. Nachr., 1903. Phys. Rev. 18, S. 58, 1904.*

E. Drude.

Stoß.

Einleitung. A. Elementare Theorie des Stoßes 1. Zentraler Stoß zweier beliebiger Kugeln. 2. Stoß unelastischer Kugeln. 3. Stoß vollkommen elastischer Kugeln. 4. Stoß unvollkommen elastischer Kugeln. 5. Allgemeiner Begriff der Stoßkraft. 6. Das d'Alembertsche Prinzip für Stoßkräfte. 7. Das ballistische Pendel. B. Elastische (höhere) Theorie des Stoßes. 8. Mängel der elementaren Theorie des Stoßes. 9. Hertzsche Theorie des Stoßes elastischer Kugeln. 10. Longitudinaler Stoß zylindrischer Stäbe.

Einleitung. Der Zusammenstoß zweier oder mehrerer Körper hat zur Folge, daß die Körper ihre Bewegungsart und ihre

Gestalt ändern. Eine genaue Beschreibung des Stoßvorganges muß Antwort auf folgende Fragen geben: Wie ist die Gestalt und Bewegungsart der Körper in jedem Zeitpunkt? Insbesondere: Wie lang dauert der Zusammenstoß? Welches sind die vorübergehenden und welches die dauernden Gestaltänderungen der Körper? Eine genaue Theorie des Stoßes hat die Gesetze der genannten Erscheinungen aufzustellen. Häufig begnügt man sich aber mit einer nur angenäherten Beschreibung des Stoßvorganges, die uns nur die Bewegungsart des Körpers vor und nach dem Stoße angibt, aber nichts darüber enthält, welche Gestaltänderungen vorgefallen sind und wie lange Zeit die angegebene Aenderung der Bewegungsart zu ihrem Zustandekommen gebraucht hat. Eine Theorie, die uns nur über die Abhängigkeit der Geschwindigkeiten nach dem Stoß von denen vor dem Stoß Aufschluß gibt, nennt man eine elementare Stoßtheorie. Ihr ist der erste Abschnitt (**A**) gewidmet. Die höhere Stoßtheorie, die erhebliche mathematische Schwierigkeiten bietet, ist im zweiten Abschnitte (**B**) angedeutet.

A. Elementare Theorie des Stoßes.

1. Zentraler Stoß zweier beliebiger Kugeln. Wir betrachten zwei Kugeln aus beliebigem Material, die sich längs einer geraden Linie bewegen, so daß die Mittelpunkte sich immer auf der Geraden befinden. Wenn die Geschwindigkeiten der Kugeln ungleich sind, kann es geschehen, daß die Kugeln zusammenstoßen, sei es, daß sie einander entgegenlaufen oder daß die langsamere von der schnelleren eingeholt wird. Wegen der Undurchdringlichkeit der Materie sind die Kugeln durch den Zusammenstoß am Beibehalten ihrer ursprünglichen Geschwindigkeit gehindert, es treten Geschwindigkeitsänderungen (Beschleunigungen) auf, was wir im Sinne der Bewegungslehre durch den Satz ausdrücken: Die Kugeln üben beim Zusammenstoß Kräfte aufeinander aus. Dadurch wird die Gestalt der Kugeln geändert und dieser Prozeß dauert so lange, bis die Kugeln die gleiche Geschwindigkeit haben. Was dann weiter geschieht, hängt, wie wir sehen werden, von der Beschaffenheit der Kugeln ab. Wie groß aber die Geschwindigkeit im Moment des Ausgleiches der Geschwindigkeiten ist, läßt sich für Kugeln aus beliebigem Material leicht angeben. Wir brauchen da nur den Satz der Bewegungslehre (vgl. den Artikel „Bewegungslehre") heranzuziehen, der aussagt, daß die Bewegungsgröße oder der Impuls eines Systems von Körpern durch die Wirksamkeit innerer Kräfte nicht geändert werden kann.

Die beiden Kugeln mögen die Massen m_1 und m_2 haben. Damit wir die Richtung der Geschwindigkeiten nicht zu unterscheiden brauchen, zählen wir alle Geschwindigkeiten von links nach rechts als positiv und die umgekehrten als negativ, was ja, da nur Bewegungen längs einer Geraden in Frage kommen, alle Möglichkeiten erschöpft. Die beiden Kugeln mögen also vor dem Stoß die Geschwindigkeiten v_1 und v_2 haben. Ihre Bewegungsgröße vor dem Stoß ist also $m_1v_1 + m_2v_2$. Im Momente des Ausgleiches der Geschwindigkeiten sei der gemeinsame Wert der Geschwindigkeiten u, die gesamte Bewegungsgröße also $m_1u + m_2u$. Nach dem angeführten Satze von der Erhaltung der Bewegungsgröße ist also:

$$m_1u + m_2u = m_1v_1 + m_2v_2$$

und für die gemeinsame Geschwindigkeit u ergibt sich:

$$u = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2} \quad \ldots\ldots\ldots (1)$$

2. Stoß unelastischer Kugeln. Nachdem nun die Kugeln eine Gestaltänderung erlitten und ihre Geschwindigkeiten ausgeglichen haben, hängt der weitere Verlauf des Vorganges davon ab, ob durch die Gestaltänderungen in den Kugeln innere Kräfte geweckt sind, welche die frühere Gestalt wieder herzustellen bestrebt sind oder nicht. Im ersteren Fall heißen die Kugeln elastisch, im letzteren unelastisch. Wir betrachten zunächst den letzteren Fall. Hier werden die Kugeln nach Ausgleich der Geschwindigkeiten sich weiter in ihrer Bewegung nicht mehr behindern und sich daher mit der durch Gleichung (1) gegebenen Geschwindigkeit weiterbewegen. Die Ausgleichsgeschwindigkeit ist zugleich die Geschwindigkeit der Kugeln nach dem Stoß; wenn wir diese Geschwindigkeiten im allgemeinen mit c_1 und c_2 bezeichnen, können wir für unelastische Kugeln einfach schreiben:

$$c_1 = c_2 = u = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2} \quad \ldots (2)$$

Wir wollen aus dieser Formel einige wichtige Spezialfälle ableiten.

1. Die Masse m_2 sei sehr groß gegenüber m_1; wenn wir dann Gleichung (2) in der Form

$u = \dfrac{\frac{m_1}{m_2} v_1 + v_2}{\frac{m_1}{m_2} + 1}$ schreiben, so ist $\frac{m_1}{m_2}$ eine zu vernachlässigende kleine Größe und es ist $c_1 = c_2 = u = v_2$, d. h. die Geschwindigkeit einer Kugel von großer Masse wird durch Zusammenstoß mit einer viel kleineren nicht geändert.

2. Die beiden Kugeln laufen einander ent-

gegen und ihre Geschwindigkeiten verhalten sich verkehrt wie ihre Massen; dann ist

$$m_1 v_1 = - m_2 v_2$$

also nach Gleichung (2) $c_1 = c_2 = u = 0$: die Kugeln kommen durch den Zusammenstoß in Ruhe.

Die Kugel m_1 nimmt an Geschwindigkeit um $u - v_1$ die Kugel m_2 um $u - v_2$ zu, die umgekehrten Größen $v_1 - u$ bezw. $v_2 - u$ bezeichnet man als „verlorene Geschwindigkeiten“ und analog $m_1(v_1 - u)$ und $m_2(v_2 - u)$ als „verlorene Bewegungsgrößen“.

3. Stoß vollkommen elastischer Kugeln. Viele Stoffe (wie z. B. Stahl, Kautschuk) suchen jede Gestaltänderung, die ihnen aufgezwungen wird, wieder rückgängig zu machen. Wenn also zwei Stahlkugeln beim Stoß ihre Geschwindigkeiten ausgeglichen und dabei Abplattungen erlitten haben, so suchen die inneren Kräfte die Kugelgestalt wieder herzustellen. Wenn dabei die ganze Bewegungsgröße, die beim Abplatten und Ausgleich der Geschwindigkeiten verloren ging, wiedergewonnen wird, nennt man das Material der Kugeln vollkommen elastisch. Wenn z. B. eine vollkommen elastische Kugel an einer festen Wand anprallt, so gleicht sie zunächst ihre Geschwindigkeit aus, d. h. kommt zur Ruhe ($u = 0$), verliert also ihre gesamte Bewegungsgröße, dann prallt sie aber von der Wand ab, stellt die Kugelgestalt wieder her und erhält ihre ganze ursprüngliche Geschwindigkeit, also auch Bewegungsgröße wieder. Mit Hilfe dieser Definition läßt sich die Geschwindigkeit vollkommen elastischer Kugeln nach dem Stoß leicht berechnen. Nach dem vorigen hat die Kugel m_1 beim Ausgleich der Geschwindigkeiten die Bewegungsgröße $m_1(v_1 - u)$ verloren und besitzt nur noch die Bewegungsgröße $m_1 u$; nun erhält sie beim Wiederherstellen der Gestalt die ganze Bewegungsgröße wieder, aber wie ja aus dem Abprallen an der festen Wand einleuchtend ist, mit umgekehrtem Vorzeichen. Es ist also die Bewegungsgröße der Kugel m_1 nach dem Stoß, wenn wir ihre Geschwindigkeit dann mit c_1 bezeichnen:

$$m_1 c_1 = m_1 u + m_1(u - v_1)$$

und für die Geschwindigkeit selbst erhalten wir

$$c_1 = 2u - v_1 \ldots\ldots\ldots\ldots 3)$$

Ebenso ergibt sich natürlich:

$$c_2 = 2u - v_2 \ldots\ldots\ldots\ldots 3)$$

Wenn wir für u seinen durch Gleichung (1) gegebenen Wert einsetzen, so können wir die Geschwindigkeiten c_1 und c_2 nach dem Stoß durch die vor dem Stoß folgendermaßen ausdrücken:

$$c_1 = \frac{v_1(m_1 - m_2) + 2 m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$
$$c_2 = \frac{2 m_1 v_1 + v_2(m_2 - m_1)}{m_1 + m_2} \ldots\ldots 4)$$

Auch aus diesen Gleichungen lassen sich einige wichtige Spezialfälle ableiten:

1. die beiden Kugeln haben gleiche Masse ($m_1 = m_2$,) dann folgt: $c_1 = v_2$ und $c_2 = v_1$, d. h. die Kugeln tauschen einfach ihre Geschwindigkeiten.

2. die Kugel m_2 ist in Ruhe ($v_2 = 0$) und ihre Masse ist sehr groß gegen m_1, dann folgt: $c_1 = -v_1$, d. h. die kleine Kugel prallt mit gleich großer aber umgekehrter Geschwindigkeit ab. Dieser Fall ist mit dem der festen Wand identisch;

Aus den Gleichungen (3) ergibt sich sofort:

$$c_1 - c_2 = -(v_1 - v_2) \ldots\ldots\ldots 5)$$

Nun ist $c_1 - c_2$ die Relativgeschwindigkeit der Kugel m_1 in bezug auf ein mit m_2 bewegliches Bezugssystem (vgl. den Artikel „Bewegungslehre“). Analoge Bedeutung hat $v_1 - v_2$ vor dem Stoß. Die Gleichung (5) besagt also: die Relativgeschwindigkeit zweier vollkommen elastischer Kugeln gegeneinander wird durch den Stoß ihre Größe nach nicht geändert, ihrem Vorzeichen nach aber umgekehrt. Das ist auch wieder eine einfache Verallgemeinerung des Abprallens von einer festen Wand.

Wenn wir hier die lebendige Kraft der beiden Kugeln vor dem Stoß und nach dem Stoß vergleichen, so findet man aus 4) nach kurzer Rechnung:

$$\frac{m_1 c_1^2}{2} + \frac{m_2 c_2^2}{2} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} \ldots 6)$$

d. h. die Summe der lebendigen Kräfte vollkommen elastischer Kugeln wird durch den Stoß nicht geändert.

4. Stoß unvollkommen elastischer Kugeln. Nicht alle Körper sind so elastisch, daß sie beim Wiederherstellen ihrer Gestalt die ganze verlorene Bewegungsgröße wieder gewinnen. Bei vielen ist es nur ein Bruchteil. Wenn ein solcher unvollkommen elastischer Körper z. B. gegen eine feste Wand stößt, wird er mit einer kleineren Geschwindigkeit abprallen, als er beim Anprall hatte. Die Erfahrung hat gezeigt, daß für zwei bestimmte Körper diese beim Wiederherstellen der Gestalt erzeugte Bewegungsgröße immer ein bestimmter Bruchteil der beim Stoße verlorenen ist. Dieser Bruchteil, den wir den Restitutionskoeffizienten nennen (restituere = wiederherstellen) und mit k bezeichnen, ist natürlich um so kleiner, je weniger elastisch ein Körper ist; für vollkommen elastische Körper wird er gleich 1. Schon Newton fand in einigen Fällen den Wert dieser Koeffizienten: für Kugeln aus

zusammengepreßter Wolle war er $\frac{5}{9}$, für Stahl und Glas gleich $\frac{15}{16}$. Wir wollen nun die Geschwindigkeiten nach dem Stoß für Kugeln vom gegebenen Restitutionskoeffizienten k berechnen. Hier erhält die Kugel m_1 nach dem Ausgleich der Geschwindigkeiten nicht die ganze verlorene Bewegungsgröße $m_1(u - v_1)$ zurück, sondern nur den Bruchteil $k m_1(u - v_1)$, wir erhalten also:

$$m_1 c_1 = m_1 u + k m_1 (u - v_1)$$

und an Stelle der Formeln 3) tritt:

$$\begin{aligned} c_1 &= u(1 + k) - k v_1 \\ c_2 &= u(1 + k) - k v_2 \end{aligned} \quad \ldots \; 7)$$

Aus diesen Gleichungen ergibt sich für $k = 0$ als Spezialfall der unelastische Stoß (Gleichung 2) und für $k = 1$ der vollkommen elastische Stoß (Gleichung 3). Wenn wir für u aus Gleichung 1 seinen Wert in Gleichung 7 einsetzen, erhalten wir:

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{v_1(m_1 - k m_2) + m_2 v_2 (1 + k)}{m_1 + m_2} \\ c_2 &= \frac{m_1 v_1 (1 + k) + v_2 (m_2 - k m_1)}{m_1 + m_2} \end{aligned} \quad 8)$$

Auch hier ergeben sich für $k = 0$ der unelastische Stoß (Gleichung 2), für $k = 1$ der vollkommen elastische Stoß (Gleichung 4).

Aus Gleichung (7) folgt durch Subtraktion:

$$c_1 - c_2 = - k (v_1 - v_2) \quad \ldots \; 9)$$

Die Relativgeschwindigkeit der Kugeln wird also durch den Stoß auf einen Bruchteil der ursprünglichen herabgedrückt, der durch den Restitutionskoeffizienten bestimmt ist.

Wir wollen nun noch die durch den Stoß entstandene Aenderung der lebendigen Kraft (kinetischen Energie) berechnen. Wir fragen zunächst um die Aenderung, die bis zum Ausgleich der Geschwindigkeiten stattgefunden hat. Nach der Gleichung (1) ist: $2(m_1 + m_2)u^2 = 2 m_1 v_1 u + 2 m_2 v_2 u$.

Diese Gleichung ziehen wir von der folgenden identischen Gleichung ab:

$$m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 + (m_1 + m_2) u^2 = m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 + (m_1 + m_2) u^2$$

dann folgt nach kurzer Rechnung:

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 - \frac{1}{2} (m_1 + m_2) u^2 = \frac{1}{2} m_1 (v_1 - u)^2 + \frac{1}{2} m_2 (v_2 - u)^2 \quad 10)$$

Diese Gleichung besagt aber: die beim Stoß bis zum Geschwindigkeitsausgleich verlorene lebendige Kraft ist gleich der lebendigen Kraft, welche die Kugeln hätten, wenn sich beide mit den beim Stoß verlorenen Geschwindigkeiten bewegten (Satz von Carnot). Beim Stoß unelastischer Kugeln ist dies die beim ganzen Stoßvorgange verlorene lebendige Kraft. Bei vollkommen elastischen Körpern wird diese lebendige Kraft beim zweiten Teil des Stoßvorganges (der Restitutionsperiode) wieder gewonnen, bei unvollkommen elastischen Körpern nur teilweise. Aus Gleichung (7) folgt:

$$\frac{1}{2} m_1 c_1^2 + \frac{1}{2} m_2 c_2^2 - \frac{1}{2} (m_1 + m_2) u^2 = k^2 \left[\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 - \frac{1}{2} (m_1 + m_2) u^2 \right]$$

Nach dieser Gleichung ist die Zunahme der lebendigen Kraft während der Periode der Wiederherstellung der Kugelgestalt (Restitution) k^2 mal so groß als der Verlust, während der Periode der Ausgleichung der Geschwindigkeiten. Daraus ergeben sich für $k = 0$ und $k = 1$ die beiden Grenzfälle. Der gesamte Verlust an lebendiger Kraft beim Stoß beliebiger Kugeln beträgt also:

$$\frac{1}{2} (1 - k^2) \left[m_1 (v_1 - u)^2 + m_2 (v_2 - u)^2 \right],$$

ein Ausdruck, der für $k = 0$ in den Carnotschen Wert (Gleichung 10) übergeht. Genau dieselben Sätze wie für Kugeln, gelten für alle Körper, für welche die Gerade, längs deren sie sich bewegen, eine Symmetrieachse ist, so z. B. für gewöhnliche Zylinder, die sich längs ihrer Achse bewegen, und aneinander stoßen.

5. Allgemeiner Begriff der Stoßkraft. Die Aenderung der Bewegungsgröße, die durch den Stoß hervorgerufen wird, muß nach den allgemeinen Grundsätzen der Bewegungslehre als Wirkung einer Kraft aufgefaßt werden. Die Bewegungslehre zeigt uns auch, wie aus der Kenntnis der Anfangsgeschwindigkeit und der Kraft zu jeder Zeit die Geschwindigkeit des Körpers berechnet werden kann (vgl. den Artikel „Bewegungslehre" Gleichung 67). Wenn ein materieller Punkt von der Masse m zur Zeit t_0 die Geschwindigkeit $\mathfrak{v}_0$ hat (wo $\mathfrak{v}_0$ ein Vektor ist) und die Kraft K zur dieser Zeit auf ihn wirkt, so ist seine Geschwindigkeit $\mathfrak{v}_1$ in einem sehr nahe an t_0 gelegenen Zeitpunkt t_1 durch folgende Gleichung gegeben:

$$m(\mathfrak{v}_1 - \mathfrak{v}_0) = K (t_1 - t_0) \quad \ldots \; 11)$$

Wenn ich nun auch die Kraft im Zeitpunkt t_1 kenne, kann ich die Geschwindigkeit nach einer weiteren kurzen Zeitspanne berechnen usw. Wenn ich nun mit $\mathfrak{v}_0, \mathfrak{v}_1, \mathfrak{v}_2 \ldots \mathfrak{v}_n$ die Geschwindigkeiten in den in kurzen Intervallen aufeinanderfolgenden Zeitpunkten $t_0, t_1 \ldots t_n$ bezeichne, mit $K_0, K_1, K_n \ldots$ die Werte der Kraft in diesen Zeitpunkten, so kann ich für jedes der Zeit-

intervalle die Gleichung 11) bilden und erhalte durch Addition aller diese Gleichungen:

$$m(\mathfrak{v}_n - \mathfrak{v}_0) = K_0(t_1 - t_0) + K_1(t_2 - t_1) + \ldots\ldots\ldots K_{n-1}(t_n - t_{n-1}) \quad . \quad . \quad 12)$$

Die rechtsstehende Summe nennt man den „Antrieb der Kraft K, während der Zeitstrecke t_1 bis t_n“. Man muß zu ihrer Berechnung die Kraft K in jedem Teilintervall kennen. Nur für ein Zeitintervall t_0, t_n, innerhalb welches die Kraft als konstant betrachtet werden kann, gilt die einfache Beziehung: Antrieb = Kraft × Zeit.

Nach Gleichung 12) muß man, um die Geschwindigkeitsänderung zu berechnen, die ein materieller Punkt, während einer gewissen Zeit erfährt nur den Antrieb der auf ihn wirkenden Kraft während dieser Zeit kennen. Dabei kommt es nicht darauf an, ob die Kraft selbst am Anfang der Zeit größer und am Ende kleiner ist oder sich umgekehrt verhält, wenn nur die Summe in Gleichung 12) dieselbe bleibt. Dadurch daß ich darauf verzichte, die Geschwindigkeit des Punktes m zu jeder Zwischenzeit zu kennen, kann ich auch auf die Kenntnis der Kraft zu jeder Zwischenzeit verzichten und kann mich mit der Kenntnis des Antriebs begnügen. Dieser Fall liegt nun bei der elementaren Theorie des Stoßes vor. Wir fragen dort wieder: wie ist die Geschwindigkeit nach dem Stoß, und nicht: wie ist die Geschwindigkeit in jedem Momente während des Stoßes?

Die Gleichungen 11) und 12) gelten (vgl. den Artikel „Bewegungslehre“ unter 19 und 20) nicht nur für materielle Punkte, sondern für beliebige Körper, die eine einheitliche Geschwindigkeit haben, wenn wir unter K die Resultierende aller äußeren Kräfte verstehen. Die inneren Kräfte heben sich gegenseitig wegen des Prinzips von der Gleichheit der Wirkung und Gegenwirkung auf. Wir können diese Gleichung also auch auf den Stoß elastischer oder unelastischer Kugeln anwenden. Wenn wir die gestoßene Kugel betrachten, können wir sagen: sie ändert ihre Geschwindigkeit unter dem Einfluß der von der stoßenden ausgeübten Kraft und wir können diese Geschwindigkeit berechnen, wenn wir den Antrieb der Kraft während der Stoßzeit kennen, ohne daß wir die Kraft in jedem Moment und die Dauer der Stoßzeit zu kennen brauchen.

Wenn eine Kraft in sehr kurzer Zeit eine Geschwindigkeitsänderung erzielt wie es beim Stoße der Fall ist, nennen wir den Antrieb der Kraft während dieser Zeit auch die „Stoßkraft dieser Kraft“. Wenn wir diese Stoßkraft, die ja als Antrieb ein Vektor ist, mit $\mathfrak{S}$ bezeichnen, so gilt für die Geschwindigkeitsänderung während der kurzen Stoßzeit von t_0 bis t_1 wegen Gleichung 11) die Gleichung

$$m(\mathfrak{v}_1 - \mathfrak{v}_0) = \mathfrak{S} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 13)$$

Man kann aus der **Stoßkraft** die Geschwindigkeitsänderung des gestoßenen Körpers berechnen. Die Gleichung 13), die aussagt: „Masse × Geschwindigkeitsänderung ist gleich Stoßkraft“, erinnert an die Grundgleichung der Bewegungslehre: „Masse × Beschleunigung ist gleich Kraft“. Man spricht deshalb häufig davon, daß eine Stoßkraft eine Geschwindigkeitsänderung zeigt, wie eine gewöhnliche Kraft eine Beschleunigung, als wäre die Stoßkraft eine spezielle Art von Kraft, während sie in Wirklichkeit keine Kraft, sondern der Antrieb einer Kraft während einer bestimmten Zeit ist. Nur im Falle des Stoßes kann man im Begriff des Antriebes die Zeit, während der er gemeint ist, weglassen, (weil immer selbstverständlich die Stoßzeit gemeint ist) und von Antrieb schlechthin reden. Und „Stoßkraft“ ist nur ein anderes Wort für „Antrieb der Kraft während des Stoßes“. Wegen der Analogie zwischen Gleichung 13) und der Grundgleichung der Bewegungslehre ist aber der Ausdruck Stoßkraft sehr bequem, weil er gestattet, aus jedem Satz der Bewegungslehre einen Satz über Stoß herzuleiten. Man hat nur überall die Begriffe Kraft und Beschleunigung durch Stoßkraft und „Geschwindigkeitsänderung während des Stoßes“ zu ersetzen.

Da wir in der elementaren Stoßtheorie die Dauer des Stoßes nicht in Betracht ziehen, können wir auch so rechnen, als würde beim Stoß die Geschwindigkeit **momentan** in die Endgeschwindigkeit geändert. Die Stoßkraft, die dann dem Produkte aus Masse und Geschwindigkeitsänderung gleich ist, kann dann nicht mehr als Produkt aus einer Kraft und der Stoßzeit (die ja Null ist) aufgefaßt werden, sondern nur als der Grenzwert eines solchen Produkts, der sich ergibt, wenn die Stoßzeit gegen Null geht und die Kraft so über alle Grenzen wächst, daß das Produkt einem endlichen Grenzwert zustrebt. In diesem Sinne spricht man gelegentlich davon, daß beim Stoß „unendliche Kräfte“ auftreten.

Wir wollen nun zunächst den Stoß unelastischer Kugeln mit Hilfe des Begriffes der **Stoßkraft** behandeln. Die Kugel m_1 übe auf m_2 eine Stoßkraft $\mathfrak{S}$ aus: die von m_2 auf m_1 ausgeübte Stoßkraft ist dann nach dem Prinzip der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung ebenso groß. Wenn die Geschwindigkeiten nach dem Stoß bei beiden Kugeln gleich u sind, so folgt aus Gleichung 13):

$$m_1(u - v_1) = \mathfrak{S} \qquad m_2(u - v_2) = -\mathfrak{S}$$

woraus sich wieder für u die Gleichung 1) ergibt.

Es lassen sich jetzt auch allgemeinere

Stoßprobleme behandeln, wobei wir uns auf den Fall des vollkommen unelastischen Stoßes beschränken.

6. Das d'Alembertsche Prinzip für Stoßkräfte. Die Gleichung 13) können wir auch schreiben:

$$m(\mathfrak{v}_0 - \mathfrak{v}_1) + \mathfrak{S} = 0$$

Nun ist $m(\mathfrak{v}_0 - \mathfrak{v}_1)$ die beim Stoße verlorene Bewegungsgröße oder der verlorene Impuls (vgl. den Artikel „Bewegungslehre"). Man kann dann die obige Gleichung so aussprechen: Durch eine Stoßkraft $\mathfrak{S}$ erfährt der Körper eine solche Geschwindigkeitsänderung, daß der verlorene Impuls als Kraft betrachtet der Stoßkraft das Gleichgewicht hält. Der „verlorene Impuls" nimmt hier die Stelle der Trägheitskraft in der Bewegungslehre ein. Er ist auch, wie man leicht sieht, nichts anderes als der „Antrieb der Trägheitskraft während der Stoßzeit", so daß wir ihn kurz die „Trägheitsstoßkraft" nennen wollen. Die Bewegungslehre (vgl. den Artikel „Bewegungslehre" unter 23) verallgemeinert nun den genannten Satz zum d'Alembertschen Prinzip, der aussagt, daß sich jeder Körper unter dem Einfluß äußerer Kräfte so bewegt, daß die durch die Bewegung geweckten Trägheitskräfte den äußeren Kräften das Gleichgewicht halten.

Wir können uns nun folgendes allgemeine Stoßproblem gestellt denken: Einer oder mehrere Körper, die beliebigen Bewegungsbedingungen unterworfen sind, werden in einem und demselben Augenblick von gegebenen Stoßkräften erfaßt; wie ändern sich die Geschwindigkeiten dieser Körper durch den Stoß? Die Antwort gibt uns das auf Stoßkräfte angewendete d'Alembertsche Prinzip: Die Körper ändern ihre Geschwindigkeiten derart, daß die durch diese Geschwindigkeitsänderungen geweckten Trägheitsstoßkräfte (oder verlorenen Impulse) den äußeren Stoßkräften das Gleichgewicht halten.

Zur Erläuterung wollen wir diesen Satz auf einen einfachen Spezialfall anwenden. Ein starrer Körper möge um eine feste Achse drehbar sein. Auf den Körper wirke keine Kraft. Nun wird plötzlich in einem bestimmten Moment eine gegebene Stoßkraft auf ihn ausgeübt, z. B. dadurch daß er mit dem Finger an einer bestimmten Stelle nach einer bestimmten Richtung gestoßen wird. Wir fragen nun: welche Winkelgeschwindigkeit wird dem Körper erteilt, wenn er anfangs in Ruhe war? Die Antwort lautet: Er nimmt eine solche Winkelgeschwindigkeit an, daß das Drehmoment der dadurch geweckten Trägheitsstoßkräfte gleich und entgegengesetzt gerichtet ist dem Drehmoment der äußeren Stoßkräfte um die feste Achse.

Im Artikel „Drehbewegung" (6 Gleichung 23) haben wir nun das Drehmoment der Trägheitskräfte eines starren Körpers um eine feste Achse berechnet. Wenn β die Winkelbeschleunigung und Θ das Trägheitsmoment um die betreffende Achse bedeutet, hat das genannte Drehmoment den Wert $\Theta\,\beta$; wenn wir nun an Stelle der Trägheitskräfte ihren Antrieb während der Stoßzeit, d. h. die Trägheitsstoßkräfte setzen, so tritt an Stelle der Winkelbeschleunigung β die Zunahme der Winkelgeschwindigkeit während des Stoßes. Da die Winkelgeschwindigkeit vor dem Stoß Null sein soll, gibt ihr Wert ω nach dem Stoß auch ihre Zunahme. Das fragliche Drehmoment lautet also: $\Theta \,.\, \omega$. Dieses muß dem Drehmoment der äußeren Stoßkraft gleich sein. Diese Stoßkraft möge den gegebenen Betrag $\mathfrak{S}$ haben; ihre Richtung sei senkrecht zur Drehungsachse und habe den Abstand p von derselben. Dann ist das Drehmoment $p \,.\, \mathfrak{S}$ und die durch den Stoß hervorgebrachte Winkelgeschwindigkeit muß der Gleichung

$$\Theta \,.\, \omega = p \,.\, \mathfrak{S} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 14)$$

genügen.

7. Das ballistische Pendel. Von der Gleichung 14) wird eine praktische Anwendung beim ballistischen Pendel gemacht, das dazu dient, die Anfangsgeschwindigkeit eines Geschosses zu messen. Es wird nämlich auf einen schweren um eine horizontale Achse drehbaren Körper durch Abfeuerung eines Geschosses eine Stoßkraft ausgeübt und aus dem ersten Ausschlag des Pendels auf seine anfängliche Winkelgeschwindigkeit ω, aus dieser auf die Größe der Stoßkraft und aus dieser auf die Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses geschlossen. Die Stoßkraft durch das Geschoß kann nun auf zwei Arten auf den drehbaren Körper (das ballistische Pendel) ausgeübt werden, die beide schon von Robins, dem Erfinder des ballistischen Pendels (etwa 1743), angewendet wurden.

Bei der ersten wird das Geschütz an einem sehr schweren Pendel befestigt und durch das Abfeuern des Geschosses ein Rückstoß auf das Pendel ausgeübt. Bei der zweiten wird die Kugel gegen das Pendel abgefeuert und dieses dadurch zum Ausschlagen gebracht. Wenn das Pendel von viel größerer Masse ist als die Kugel, wird die Geschwindigkeit, die dasselbe durch den Schuß erhält offenbar viel kleiner sein als die der Kugel.

Wir wollen die erste Methode rechnerisch verfolgen. Die Kugel wird aus der Ruhe beim Abfeuern auf ihre Anfangsgeschwindigkeit v gebracht. Wenn ihre Masse m ist, ist also die Stoßkraft $\mathfrak{S}$, die sie auf diese Geschwindigkeit bringt nach Gleichung 13) durch

$$\mathfrak{S} = m \,.\, v$$

gegeben. Der Rückstoß, der dadurch auf das Pendel ausgeübt wird, ist gleich groß und entgegengesetzt gerichtet, hat also den Wert mv; die Winkelgeschwindigkeit, die das Pendel dadurch erhält, ist also nach Gleichung 14) durch $\Theta \cdot \omega = mvp$ bestimmt: es ist also:

$$\omega = \frac{mvp}{\Theta} \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ 15)$$

Die Winkelgeschwindigkeit ω aber kann man leicht aus dem ersten Ausschlag des Pendels berechnen; wir wollen den Winkel, um den das Pendel durch den Stoß aus der vertikalen Lage abgelenkt wird (den ersten Ausschlag) mit α bezeichnen. Nach dem Energieprinzip ist die lebendige Kraft, die das Pendel beim Fallen aus der Ablenkung α in die Ruhelage erlangt, gleich der lebendigen Kraft, die man ihm in der Ruhelage geben mußte, um den Ausschlag α zu erzielen. Nun ist die lebendige Kraft des Pendels bei der Winkelgeschwindigkeit ω durch $\frac{1}{2}\Theta\omega^2$ gegeben (vgl. den Artikel „Drehbewegung" unter 12). Beim Fallen des Pendels in die Ruhelage sinkt der Schwerpunkt des Pendels, wenn sein Abstand von der Achse h beträgt, offenbar um das Stück $h(1-\cos\alpha)$; die Arbeit, die dabei von der Schwerkraft geleistet wird, ist gleich der beim Fallen in die vertikale Lage erlangten lebendigen Kraft. Wenn also M die Masse des Pendels und g die Beschleunigung der Schwere ist, so gilt:

$$Mgh(1-\cos\alpha) = \frac{1}{2}\Theta\omega^2$$

Aus dieser Gleichung in Verbindung mit Gleichung (15) folgt, (wenn wir mit p den Abstand des Geschützes von der Achse bezeichnen): $2\,Mgh(1-\cos\alpha) = \frac{m^2v^2p^2}{\Theta}$, woraus sich für die gesuchte Anfangsgeschwindigkeit v des Geschosses der Wert

$$v = \frac{1}{mp}\sqrt{2M\Theta gh(1-\cos\alpha)}$$

Die rechts stehenden Größen sind alle durch Messung und Beobachtung bekannt; man kann also auch v berechnen.

B. Elastische Theorie des Stoßes.

8. Mängel der elementaren Theorie des Stoßes. Die elementare Theorie des Stoßes vollkommen elastischer Körper ergibt, daß sowohl die Bewegungsgröße als auch die lebendige Kraft der stoßenden Kugeln beim Stoße erhalten bleiben, daß also in der Bezeichnung des Abschnittes 3 die folgenden Beziehungen gelten:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1c_1 + m_2c_2$$
$$\frac{m_1v_1^2}{2} + \frac{m_2v_2^2}{2} = \frac{m_1c_1^2}{2} + \frac{m_2c_2^2}{2};$$

andererseits lassen sich auch wieder aus diesen beiden Gleichungen die Formeln für den Stoß vollkommen elastischer Kugeln herleiten.

Nun zeigt aber schon eine flüchtige Ueberzeugung, daß die letzte Gleichung in Wirklichkeit nicht gut erfüllt sein kann. Denn die lebendige Kraft elastischer Kugeln nach dem Stoß besteht nicht nur in der Geschwindigkeit ihrer Mittelpunkte (c_1 oder c_2), sondern es wird durch den Stoß die ganze Masse der Kugel zu Schwingungen angeregt; es laufen elastische Wellen durch den Körper hindurch und deren lebendige Kraft kommt zu dem Gliede $\frac{m_1c_1^2}{2} + \frac{m_2c_2^2}{2}$ hinzu. In roher Weise werden diese Verhältnisse schon durch die Formeln für den Stoß unvollkommen elastischer Körper wiedergegeben, eine vollständige Beschreibung und Darstellung können sie aber nur durch eine Theorie finden, welche die Gestaltänderung der Körper in jedem Zeitpunkt des Stoßes verfolgt und so die entstehenden Schwingungen in Rechnung zieht. Die elementare Theorie des Stoßes, die ganz auf den Sätzen von der Erhaltung der Energie- und Bewegungsgröße beruht, nennt man auch häufig „mechanische" Theorie des Stoßes. Ihr gegenüber tritt die „elastische" Theorie des Stoßes, die den ganzen Stoßvorgang bis ins einzelne verfolgt. Sie ist erst in einigen speziellen Fällen durchgeführt. Eine Zusammenstellung des bisher geleisteten findet man in dem Artikel „Elastischer Stoß" von F. Auerbach in Winkelmanns Handbuch der Physik, II. Aufl., Bd. I 1.

9. Hertzsche Theorie des Stoßes elastischer Kugeln. H. Hertz hat (Gesammelte Werke, Bd. I S. 155ff.) die Frage behandelt, wie stark sich zwei elastische Kugeln deformieren, die an einem Punkte durch einen gegebenen äußeren Druck zusammengepreßt werden. Er hat diese Resultate auch auf den Stoß angewendet und die Stoßzeit berechnet. Er findet bei zwei Stahlkugeln vom gleichen Radius r, die mit der relativen Geschwindigkeit v gegeneinander prallen, für die Stoßzeit τ die Formel

$$\tau = \frac{0.000024\ R}{\sqrt[5]{v}} \text{ Sekunden.}$$

So würde z. B. für Kugeln vom Radius 25 mm und der relativen Geschwindigkeit von 10 mm pro Sekunde die Stoßzeit (d. h. die Zeit der Berührung) nur 0,00038 Sekunden betragen; für zwei Kugeln von der Größe der Erde und derselben Geschwindigkeit hingegen 27 Stunden.

10. Stoß von Zylindern. Die ausführlichste Behandlung hat bisher der Stoß von Zylindern gefunden, die in der Richtung ihrer Achse aneinanderprallen. Die neueste Literatur samt Versuchen darüber findet man bei Ramsauer (Annalen der Physik, Bd. 30, 1909). Die wichtigsten Unterschiede, die sich zwischen der mechanischen und der elastischen Theorie für diesen Fall ergeben, lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: (nach F. Auerbach l. c.) Wir denken uns zwei Stäbe aus gleichem elastischem Material, die längs ihrer Achse sich bewegen und aneinander stoßen. Dabei möge immer der eine ruhen. Dann sind drei Fälle zu unterscheiden: 1. die beiden Stäbe sind gleich lang; 2. der längere stößt an den kürzeren; 3. der kürzere stößt an den längeren.

Im Falle 1 wird nach beiden Theorien der stoßende liegen bleiben und seine ganze Geschwindigkeit auf den ruhenden übertragen.

Im Falle 2 sagt die mechanische Theorie: Der längere Stab überträgt eine gesteigerte Geschwindigkeit auf den kürzeren und geht selbst noch langsam mit. Die elastische Theorie hingegen sagt: Der längere überträgt nur seine (eigene) Geschwindigkeit auf den kürzeren und geht selbst langsam, aber etwas schneller als nach der mechanischen Theorie mit.

In Falle 3 überträgt nach der mechanischen Theorie der kürzere Stab einen Teil seiner Geschwindigkeit auf den längeren und springt selbst zurück, während er nach der elastischen Theorie einen größeren Teil seiner Geschwindigkeit als nach der mechanischen auf den längeren überträgt und selbst zur Ruhe kommt.

Es ist leicht einzusehen, daß die mechanische Theorie des elastischen Stoßes am ehesten dann realisiert ist, wenn die Körper selbst nicht geeignet sind elastische Wellen aufzunehmen. Die Körper müssen also möglichst starr sein und die elastische Einwirkung aufeinander muß auf federnde Köpfe von geringer Masse, mit der sie beim Stoß einander berühren, hergestellt werden. Wenn hingegen wesentliche Massen in Schwingungen geraten, muß die elastische Theorie herangezogen werden, die mathematisch so verwickelt ist, daß wir hier nur einige Ergebnisse anführen konnten und sonst auf die angegebene Literatur verweisen müssen.

Literatur. **Thomson und Tait,** *Handbuch der theoretischen Physik. Deutsch von Helmholtz und Wertheim, Braunschweig 1871.* — **Routh,** *Dynamik der Systeme starrer Körper. Leipzig 1898, Bd.* I. — **F. Auerbach,** *Elastischer Stoß in Winkelmanns Handbuch der Physik. Bd.* I*I.* — **C. Ramsauer.** *Experimentelle und theoretische Grundlagen des elastischen und mechanischen Stoßes. Annalen der Physik, Bd.* 30, *Jahrg. 1909 (enthält die neueste Literatur). — Die elementare Theorie des Stoßes ist am ausführlichsten in der älteren Literatur behandelt, besonders bei* **Poisson,** *Traité de mécanique. Deutsch unter dem Titel „Lehrbuch der Mechanik“ Stuttgart 1826.*

Ph. Frank.

Strahlende Aetherenergie.

1. Die Hypothese des elastischen Aethers. a) Die Anfänge der elastischen Lichttheorie. b) Volle Entwickelung der elastischen Theorie. c) Erweiterungen der elastischen Theorie. d) Mechanismus des Energietransportes. 2. Die Hypothese des elektromagnetischen Aethers. a) Die Theorie von Maxwell. b) Eingreifen der Elektronenhypothese. c) Mechanismus des Energietransportes. d) Röntgenstrahlen. 3. Moderne Bewegung zur Beseitigung der Aetherhypothese.

1. Die Hypothese des elastischen Aethers. 1a) Die Anfänge der elastischen Lichttheorie. Der uns von Materie leer scheinende Raum gestattet nach der Erfahrung einen Transport von Energie zwischen getrennten darin befindlichen Körpern. Durch den Weltenraum, den wir für von Materie leer halten, gelangt von der Sonne Energie zur Erde, wie sich das durch die optischen, thermischen, chemischen und sogar elektrischen Wirkungen der Sonnenstrahlen manifestiert.

Die erste Erklärung dieses Energietransports versuchte die Newtonsche Emissionstheorie des Lichtes (1669). Sie betrachtete den Weltenraum als faktisch absolut leer und dachte den Energietransport durch ihn hindurch vermittelt durch materielle Teile, die von dem Energie entsendenden Körper gleich Geschossen ausgestoßen werden und den aufnehmenden treffen. Schwierigkeiten, welche diese Hypothese bei der versuchten Erklärung von Polarisations- und Interferenzerscheinungen fand, führten zu ihrer Aufgabe und zur Herrschaft der Huygensschen Undulationstheorie, die einen wirklich leeren Raum verneint.

Nach Huygens (1678) bleibt auch nach Beseitigung wägbarer materieller Teile in einem Raume noch eine unwägbare Substanz zurück, welche alle Wände zu durchdringen vermag und sich daher nicht beseitigen läßt, der Aether. Diese hypothetische Substanz ist uns einzig und allein durch die Rolle, die sie bei der Lichtfortpflanzung spielt, wahrnehmbar; es gibt keine anderen Beobachtungen, um auf ihre Eigenschaften zu schließen, als optische. Der Energietransport von einem Körper zum anderen

geschieht nach Huygens im Aether analog wie die Fortpflanzung eines Stoßes durch eine Reihe sich berührender elastischer Kugeln. Wird auf die erste von ihnen der Stoß ausgeübt, so springt die letzte ab, die dazwischen liegenden Kugeln lassen keine Beteiligung an dem Vorgang erkennen, obwohl eine solche vorhanden ist.

Durch Ausgestaltung seiner Stoßhypothese vermochte Huygens eine Reihe optischer Erscheinungen auch quantitativ zu erklären.

Euler (1745) führte dann die Vorstellung ein, daß die Lichterscheinungen speziell auf periodischen Schwingungen beruhen, und daß die verschiedenen Farben durch die verschiedene Schnelligkeit dieser Schwingungen, präziser durch die in der Sekunde stattfindende Schwingungszahl charakterisiert würden.

Die Entdeckung der Interferenzerscheinungen (vgl. den Artikel „Lichtinterferenz") stellte der Theorie neue Probleme und führte besonders durch Th. Young (1801) zu einer neuen Etappe in der Entwickelung der Aethertheorie, die charakterisiert ist durch die vollständige Parallelisierung der Optik zur Akustik der Gase und Flüssigkeiten. Licht besteht danach in periodischen Wellen mit longitudinalen Schwingungen innerhalb eines als Flüssigkeit zu betrachtenden Mediums (Aethers). Die Interferenzen erklären sich durch die gegenseitig ungestörte Fortpflanzung mehrerer in demselben Raume fortschreitenden Wellen, die auch in der Akustik nachweisbar ist.

Das Nebeneinanderbestehen verschiedener Schwingungen bezieht sich dabei ebenso auf solche gleicher Farbe, d. h. gleicher Schwingungszahl, wie auf solche verschiedener. Farbengemische, z. B. auch weißes Licht, entstehen durch gleichzeitiges Fortschreiten von Wellen verschiedener Schwingungszahl, von denen eine jede sich verhält und betrachtet werden kann, als wenn sie allein vorhanden wäre.

1b). Volle Entwickelung der elastischen Theorie. Wesentliche Um- und Ausgestaltung erfuhr die Undulationshypothese durch Fresnel (nach 1820). Die Polarisationserscheinungen (vgl den Artikel „Lichtpolarisation") erwiesen sich als mit longitudinalen Wellen, also mit einem flüssigen Aether unvereinbar; es war die Annahme transversaler Schwingungen nötig, wodurch der Aether zu einem, wenigstens gegenüber Lichterscheinungen, festen Körper wurde. Da aber feste Körper neben transversalen auch longitudinale Schwingungen fortpflanzen, so bot das Fehlen der letzteren eine große Schwierigkeit, die um so mehr hervortrat, je mehr in der Periode nach Fresnels Wirksamkeit die allgemeine Theorie der Elastizität Ausbildung erfuhr.

Zwei Auswege sind versucht worden, die beide praktisch zu äquivalenten Resultaten führten, dem Aether eine Konstitution beizulegen, welche longitudinale Schwingungen entweder mit unendlich großer oder aber mit unendlich kleiner Geschwindigkeit fortpflanzt. In keinem von beiden Fällen entstehen dann eigentliche longitudinale Wellen.

Dergleichen Annahmen verlieren das Gezwungene einigermaßen, wenn man bedenkt, daß eben nur die Lichterscheinungen uns Nachricht über Existenz und Eigenschaften des Aethers zu geben vermögen, und daß die Lichtschwingungen so überaus schnelle sind, daß ein Körper sich ihnen gegenüber immerhin anders verhalten mag, als gegenüber anderen, langsameren Bewegungen. Man kann die unendlich große Geschwindigkeit der longitudinalen Lichtwellen durch Annahme eines überaus großen, die unendlich kleine durch die Annahme eines überaus kleinen Widerstandes des Aethers gegen Kompression erklären.

Nach Fresnel ist auch bei der Fortpflanzung des Lichtes im Innern ponderabler Körper der daselbst befindliche Aether der eigentliche Träger der Schwingungen; die ponderable Masse veranlaßt nur eine in den verschiedenen Körpern verschiedene Konstitution des Aethers. Da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Welle durch die Quadratwurzel aus dem Quotienten e/d „Elastizitätszahl durch Dichtigkeit" des schwingenden Körpers gemessen wird, so kann eine von Körper zu Körper wechselnde Lichtgeschwindigkeit durch Veränderlichkeit beider Größen bedingt sein. Indessen sind die Erscheinungen der Reflexion und Brechung, wie hier nicht gezeigt werden kann, mit einer gleichzeitigen Veränderung von e und d nicht vereinbar. Fresnel entschied sich dafür, die Dichte des Aethers in verschiedenen Körpern verschieden zu nehmen, bei gleicher Elastizität. Da in Kristallen die Lichtgeschwindigkeiten in verschiedenen Richtungen desselben Individuums verschieden sind, die Dichte (d. h. die Masse der Volumeneinheit) aber eine richtungslose Größe ist, so versagt diese Annahme im Grunde bei Kristallen, und Fresnel war gezwungen, für die letzteren Körper dem Aether eine ad hoc konstruierte Elastizitätstheorie aufzuerlegen, um die Erscheinungen zu erklären.

Fr. Neumann (um 1835) hat sich für die Veränderlichkeit der Elastizität des Aethers in verschiedenen Körpern entschieden und dadurch eine Grundlage gebildet, auf der ohne Willkür auch die Theorie der Kristalloptik errichtet werden konnte. Es mußte

dazu der Aether in einem Kristall als selbst ein Kristall von äußerst kleiner Kompressibilität betrachtet werden. Auf diesen Grundlagen hat die Theorie der Kristalloptik dann eine vielfältige Ausgestaltung erfahren.

Auch über das Verhalten des Aethers in bewegten Körpern hat Fresnel Ideen geäußert. Gewisse Erscheinungen der „Aberration" des Lichtes der Gestirne, hervorgerufen durch die Bewegung der Erde im Weltenraume forderten zur Erklärung die Annahme, daß der Aether an der Bewegung der Körper teilnähme, doch aber so, daß er nicht deren volle Geschwindigkeit erhielte, sondern nur den $(n^2-1)/n^2$ten Teil, unter n den Brechungsindex verstanden (vgl. den Artikel „Lichtfortpflanzung in bewegten Medien"). Da nun aber n von der Farbe des Lichtes abhängt (vgl. den Artikel „Lichtdispersion"), so war klar, daß dieses Gesetz nur eine Annäherung, die ungenaue Form eines strengen Gesetzes sein könnte.

Die Vereinigung der hiernach einander bis zu einem gewissen Grade sich widersprechenden Eigenschaften des Aethers — feste Konstitution und Beweglichkeit - konnte nur einigermaßen gewaltsam durch Hervorhebung der speziellen Wirkungen der äußerst schnellen Bewegungen in einer Lichtwelle erzwungen werden. Immerhin blieben Schwierigkeiten übrig, z. B. bezüglich des Verhaltens des Aethers in der Umgebung eines bewegten Himmelskörpers, wo man sich seinen Zustand nur schwer als von der Bewegung (die im Innern stattfinden soll) unberührt denken kann.

1c) Erweiterungen der elastischen Theorie. Ein Gebiet der Optik wurde durch die im vorstehenden skizzierte Theorie des elastischen festen Aethers noch gar nicht beherrscht, die Dispersion, d. h. die Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Farbe, die nach der Erfahrung verbunden ist mit selektiver Absorption, d. h. mit der verschiedenen Schwächung verschiedener Farben. Denn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen in einem gewöhnlichen elastischen Medium ist für alle Schwingungszahlen die gleiche, und wenn auch in festen elastischen Körpern dämpfende Kräfte wirken, welche erregte Schwingungen absorbieren, so wirken diese doch nicht selektiv auf einzelne Schwingungszahlen.

Es entstand somit der Zwang, die rein elastische Aethertheorie so zu erweitern, daß sie diese Erscheinungen mit umfaßte. Da Dispersion und Assorption nur innerhalb ponderabler Körper eintreten, so mußte eine neue, direkte Beteiligung der ponderablen Teile an den Aetherschwingungen (deren Anteil nach der früheren Annahme nur ein indirekter, durch veränderte Konstitution des Aethers vermittelter war) erfunden werden. Dies ist von Sellmeyer (1871) zuerst versucht und von Helmholtz (1874) in exakterer Form wiederholt worden.

Nach dieser vervollständigten elastischen Theorie bewegen die Schwingungen des Aethers leichte Elementarteile (über deren Natur eine Entscheidung vorbehalten bleibt), welche schwingungsfähig (wie Pendelchen) an die ponderabeln Moleküle gebunden sind. Diese Pendelbewegungen sind um so kräftiger, je näher die Schwingungszahl der Welle mit der der Pendelchen übereinstimmt (vgl. den Artikel „Schwingungen. Erzwungene Schwingungen"). Die Pendelschwingungen unterliegen aber ihrerseits im Molekül Reibungskräften, die um so stärker wirken, je größer die Schwingungen sind. Auf diese Weise werden in einer Welle, die eine Superposition verschiedener Schwingungen, d. h. ein Farbengemisch enthält, diejenigen Farben selektiv am meisten geschwächt, deren Schwingungszahlen mit denjenigen der verschiedenen Pendelchen in den Körpermolekülen übereinstimmen. Dieser Prozeß wirkt zugleich auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle ein, derart, daß die Anteile mit geringerer Schwingungszahl verlangsamt, diejenigen mit größerer beschleunigt werden. In dieser Weise entsteht in Verbindung mit der selektiven Absorption auch die Dispersion.

Die nach der bezeichneten Richtung vervollständigte Theorie des elastischen Aethers hat bedeutendeErfolge zu verzeichnen gehabt. Es ist ihr gelungen, nahezu das ganze Gebiet der optischen Erscheinungen — auch z. B. jene von Fresnel divinierte Beziehung über die Mitführung des Aethers durch bewegte Körper zu erklären, d. h. mathematisch abzuleiten. Immerhin blieb die Frage der longitudinalen Welle, über die in 1b gesprochen ist, von ungeänderter Schwierigkeit.

1d) Mechanismus des Energietransportes. Eine besondere Erwähnung verlangt die Art, wie nun nach der so charakterisierten Anschauung die Energie im Aether von Körper zu Körper transportiert, gestrahlt wird.

Die emittierenden Elemente eines Körpers sind jene pendelartigen Gebilde innerhalb seiner Moleküle, die infolge der Temperatur des Körpers oder infolge anderer (chemischer, elektrischer) Vorgänge in demselben schwingen. Dieselben Kräfte, welche, zwischen ihnen und dem Aether wirkend, bei dem Vorgang der Absorption Bewegungen vom Aether auf die Pendelchen übertragen, veranlassen nun umgekehrt, bei primär vorhandenen Pendelbewegungen, Schwingungen in dem umgebenden Aether, die sich fortpflanzen, ähnlich wie die Bewe-

gungen, die wir mit der Hand dem Ende eines gespannten Seiles erteilen, über das Seil fortschreiten. Treffen sie einen anderen Körper, so wirken sie auf dessen Pendelchen und indem sie, wie oben geschildert, geschwächt weiterziehen, übertragen sie einen Teil ihrer Energie auf jene Pendelchen; da jene aber an die ponderabeln Moleküle gebunden sind, so geschieht die Uebertragung auch auf letztere. Die Energie eines bewegten Pendels besteht aus den beiden Teilen: Bewegungsernergie, bestimmt durch seine momentane Geschwindigkeit, und Kraftenergie, bestimmt durch die momentan darauf wirkende Kraft. Bei ungedämpften Schwingungen ist die Summe aus beiden Teilen konstant, und die Bewegung besteht in letzter Instanz in abwechselndem Wachsen und Abnehmen eines jeden Teiles auf Kosten des anderen. Auch bei jedem von der Bewegung ergriffenen Aetherteilchen gibt es zwei analoge Energieteile: Bewegungsenergie, die auf der vorhandenen Geschwindigkeit, Kraftenergie, die auf den vorhandenen elastischen Spannungen beruht. Bei ungedämpften Schwingungen stehen dieselben, während sie periodisch wechseln in einem konstanten gegenseitigen Verhältnis. Auf das empfangende Pendel lassen sich die über das aussendende gemachten Bemerkungen übertragen.

Dies ist der Mechanismus der Energieübertragung innerhalb des freien Aethers. Derselbe findet genau ebenso statt innerhalb eines Mediums, das die in Frage kommenden Schwingungen nicht merklich absorbiert, falls in dasselbe der emittierende und der empfangende Körper eingetaucht sind. Absorbiert das Zwischenmedium selber, so geht unterwegs von der ausgestrahlten Energie verloren.

Zu dem eigentlichen Begriff des (Licht- oder Wärme-) Strahles führt die Erfahrungstatsache, daß unter Umständen, besonders wenn es sich um eine sehr kleine, in angemessenen Entfernungen punktförmig erscheinende Lichtquelle handelt, ein dunkler Schirm mit ausgeschnittener Oeffnung, in den Weg der Strahlung gehalten, aus dieser ein weiterhin merklich scharf begrenztes Bereich ausschneidet, außerhalb dessen die Schwingungen nicht wahrnehmbar sind. Es gibt in diesem Falle also eine die Welle seitlich begrenzende Kegel- oder Zylinderfläche, durch die hindurch keine Energie in das benachbarte Medium übertragen wird. Hiermit ist die präzise theoretische Definition der Umgrenzung eines Strahles formuliert, wie sie von Kirchhoff (1876) gefaßt worden ist.

2. Die Hypothese des elektromagnetischen Aethers. 2a) Die Theorie von Maxwell. Eine neue Epoche in der Theorie der Energiebewegung im Aether wurde durch Maxwell (1871) eröffnet mit der Einführung der Vorstellung, daß der Aether kein Sitz mechanischer, sondern nur ein solcher elektromagnetischer Vorgänge wäre. Aehnlich wie nach der älteren Theorie, wo Aether als ein Medium galt, das die elastischen Eigenschaften greifbarer Körper in spezieller Ausbildung besitzt, soll es nach der neuen Theorie bezüglich der elektromagnetischen Eigenschaften sein.

Der Aether ist nach ihr ein absoluter Isolator für Elektrizität, der sich gegenüber allen anderen Isolatoren durch maximale Durchdringlichkeit für elektrische Kräfte auszeichnet in dem Sinne, daß in allen anderen Medien, die mit ihm einem elektrischen Felde ausgesetzt sind, die elektrische Feldstärke kleiner ist, als sie an derselben Stelle nach Beseitigung des Mediums sein würde.

Bewegt man in dem Aether eine elektrische Ladung hin und her, so entsteht dadurch in deren Umgebung ein zeitlich wechselndes elektrisches Feld, das sich auf einen eingebrachten kleinen elektrisierten Körper in einer zeitlich wechselnden Kraft manifestieren würde. Zugleich entsteht in der Umgebung der bewegten Ladung, die bis zu einem gewissen Grade einem elektrischen (Wechsel-)Strome (in dem ja auch Ladungen transportiert werden) äquivalent ist (wie bei jenem), ein veränderliches magnetisches Feld, das sich durch eine Kraftwirkung auf eine eingebrachte kleine magnetische Masse äußern würde.

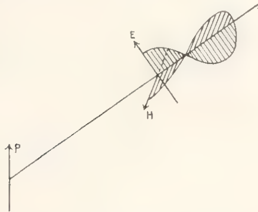
Der Aether verhält sich gegenüber den beiden erregten Feldern ganz ähnlich wie ein elastischer Körper gegenüber in ihm erregten Verrückungen und Spannungen: ihre Wirkung breitet sich nach allen Seiten aus, und wenn die Erregung periodisch mit der Zeit wechselt, so entsteht die Fortpflanzung eines Wellensystemes.

Damit der ganze Vorgang in merklicher Stärke eintrete, muß die Geschwindigkeit resp. Beschleunigung der durch ihre Bewegung die Erregung gebenden Ladung eine äußerst große sein, viel größer als sie durch mechanische Mittel herstellbar ist. In dem Artikel über „Elektrische Schwingungen“ ist darüber des näheren berichtet. Hier sei nur wiederholt, daß H. Hertz (1888) diejenigen Bewegungen der Elektrizität, die bei einer Entladung zwischen zwei Konduktoren eintritt und die in äußerst schnellen Schwingungen verläuft, benutzt und damit zum ersten Male die Konsequenzen der Maxwellschen Auffassung realisiert hat.

Von einem solchen Hertzschen Erreger, einem Paar von mehr oder weniger stabförmigen Konduktoren, zwischen denen elektrische Ladungen übergehen, breitet sich

nun ein System elektromagnetischer Wellen in den Raume aus, welche große Aehnlichkeit zu denjenigen mechanischen Wellen haben, die von einer in geradlinigen Schwingungen erhaltenen Stelle eines elastischen Mediums ausgehen. In genügender Entfernung von der Erregungsstelle können die Wellenzüge als eben angesehen werden, insofern je Punkte von Ebenenstücken, die normal zu dem Radiusvektor nach der Erregungsstelle liegen, sich in gleichem Schwingungszustand befinden.

Aber während die bezüglichen Schwingungen bei einem gewöhnlichen elastischen Körper einen longitudinalen Anteil haben, sind die bezüglichen elektromagnetischen Schwingungen rein transversal; sowohl die schwingende elektrische, als die magnetische Feldstärke liegen andauernd in der Wellenebene, und zwar die elektrische E in der Richtung der Projektion des Erregers P auf die Wellenebene, die magnetische H normal dazu



(s. die Figur). Es ergibt sich also für die elektromagnetischen Wellen im Aether von selbst jener Zustand, der für die elastischen Wellen nur durch Einführung einer ganz besonderen und an sich nicht besonders einleuchtenden Eigenschaft der Elastizität des Aethers zu gewinnen war.

Wie bezüglich der Energie in einem schwingenden elastische Medium bemerkt war, daß sie aus zwei Teilen, Bewegungs- und Kraftenergie bestehe, so zerfällt auch die elektromagnetische Energie in zwei Teile, die sich resp. durch die schwingende elektrische und magnetische Feldstärke allein bestimmen. Bezeichnet man die bezüglichen Größen mit E und H, so ist diese Energie, bezogen auf die Volumeneinheit, gegeben durch

$$\frac{1}{8\pi}(E^2 + H^2)$$

Beim Fortschreiten einer Welle wandert die Energie mit der Welle derart, daß in der Zeiteinheit durch die Flächeneinheit der Welle der Betrag

$$\frac{c}{4\pi} EH$$

hindurchgeht, unter c die Lichtgeschwindigkeit im Aether verstanden. Bei regelmäßigen periodischen Schwingungen im Aether sind E und H in jedem Moment einander gleich.

2b) Eingreifen der Elektronenhypothese. Was die Rolle des Aethers bei der Fortpflanzung der elektromagnetischen Schwingungen innerhalb ponderabler Körper betrifft, so macht die Maxwellsche Theorie darüber keine speziellen Annahmen. Sie betrachtet diese Körper als nur quantitativ vom Aether verschieden, mit analogen, aber zahlenmäßig verschiedenen Eigenschaften, zu denen gelegentlich noch die Leitfähigkeit für Elektrizität hinzutritt. Sie verfährt darin vollkommen analog der elastischen Lichttheorie im Sinne von 1b, die in ponderabeln Körpern nur einen Aether von anderer Konstitution annahm.

Die Folgen dieser Auffassung sind auch auf beiden Seiten die gleichen: wie die eigentliche elastische, so liefert auch die eigentliche Maxwellsche elektromagnetische Lichttheorie keine Erklärung für die Erscheinungen der Dispersion und selektiven Absorption. Das Mittel, durch welches diese Lücke ausgefüllt wird, ist auch in beiden Fällen das gleiche: die Annahme von sehr kleinen (hier elektrischen) Elementarmassen in den ponderabeln Molekülen, welche derartig an letztere gebunden sind, daß sie eine Art von (allgemeiner) Pendelschwingung ausführen können (H. A. Lorentz 1892). Aber während in der elastischen Theorie diese Elementarmassen ad hoc angenommen waren und sich auf keine andere Weise manifestierten, als in den Dispersions- und Absorptionserscheinungen, gelang es hier (vgl. die Artikel „Elektronen" und „Magnetooptik"), sie als identisch mit denen zu erweisen, welche sich in den Kathodenstrahlen (worüber in dem bezüglichen Artikel nachzulesen) projektilartig bewegen — mit den (negativen) Elektronen. Hiermit war nun die Theorie der Dispersion und selektiven Absorption auf eine unermeßlich viel solidere Grundlage gestellt, als dies im Gebiete der erweiterten elastischen Theorie möglich gewesen war.

2c) Mechanismus des Energietransportes. Im übrigen sind die Grundvorstellungen über den Transport der Energie durch Strahlung in beiden Theorien ganz die gleichen. Die in ponderabeln Körpern eigentlich Energie emittierenden Elemente sind die Elektronen, die infolge der allgemeinen Wärmebewegung oder infolge besonderer Antriebe durch chemische oder elektrische Vorgänge die ihnen eigentümlichen Pendelschwingungen ausführen (vgl. auch den Artikel „Elektromotorische Kräfte"). Die ponderabeln Teile selbst, mit denen man positive Ladungen fest ver-

bunden denkt, werden allerdings nach allgemeinen mechanischen Gesetzen an den Bewegungen teilnehmen müssen, aber wegen ihrer mehrere tausend Male größeren Masse mit entsprechend kleinerer Amplitude. Die an ihnen haftenden positiven Ladungen werden bei ihren Bewegungen gleichfalls Energie emittieren, aber in ihrer Wirkung weit hinter den Elektronen zurückbleiben.

Trifft die ausgehende Welle auf einen ponderabeln Körper, so werden in erster Linie dessen Elektronen von den in der Welle schwingenden Kräften ergriffen, und zwar wirkt hier (wie in dem Artikel „Elektronen" zu vergleichen) in erster Linie die elektrische Kraft. Die von den Elektronen (und in geringerem Maße von den positiv geladenen ponderabeln Molekülen) aufgenommene Energie ist der einfallenden Welle entzogen, so daß dieselbe in entsprechend geschwächter Stärke weiterzieht.

Auch in ponderabeln Körpern wird die Strömung der Energie in der Welle — die sich nach dem Gesagten gewissermaßen im Aether zwischen den Molekülen und Elektronen vollzieht — durch das früher erläuterte Produkt

$$\frac{c}{4\pi} EH$$

dargestellt; sie nimmt also ab, wenn die elektrische und damit auch die magnetische Feldstärke abnimmt. In ponderabeln Körpern ist bei regelmäßigen periodischen Schwingungen für jede Farbe die magnetische Feldstärke, H, ihrer Größe nach das n fache der elektrischen, E, wobei n wieder den Brechungsindex bezeichnet.

Der Begriff des Strahles selbst ist in der elektromagnetischen Theorie ganz analog formuliert, wie in der elastischen. Wenn ein Wellensystem sich durch eine Röhrenartige Fläche so begrenzen läßt, daß durch diese Fläche keine Energie ein oder austritt, daß also die Energie völlig innerhalb der Röhre fließt, so nennt man den begrenzten Abteil ein Strahlenbündel, bei kleinem Querschnitt ein elementares Strahlenbündel oder auch wohl einen Strahl. Es mag hervorgehoben werden, daß über den Verlauf einer Energieströmung oder eines elementaren Strahlenbündels in einem beliebigen von Schwingungen durchzogenen Körper der merkwürdige von Poynting (1884) gegebene Satz besteht, daß diese Strömung in der oben angegebenen Stärke in jedem Moment normal zu der Ebene verläuft, die an jeder Stelle durch die momentane Richtung der daselbst herrschenden elektrischen und magnetischen Feldstärke gelegt werden kann.

Bei regelmäßigen periodischen Schwingungen — wie z. B. bei den in 2a betrachteten ebenen Wellen, die im Aether von einem Hertzschen Erreger in große Entfernung ausgehend — ist diese Richtung meist zeitlich konstant; in anderen Fällen oszilliert sie in mäßiger Weise um eine mittlere Richtung derart, daß im schließlichen Effekt nur diese Richtung als Strahlenrichtung erscheint.

2a) Röntgenstrahlen. Alle Energieübertragung im leeren Raume von Körper zu Körper findet nach der elektromagnetischen Theorie des Aethers entweder durch Schwingungen in der oben besprochenen Art oder aber durch Stoßwirkungen zwischen Massen statt, die dabei ihre Bewegungsenergie gegenseitig verändern. In ponderabeln Körpern kommen dazu noch die elastischen Vorgänge, von denen es übrigens nicht unwahrscheinlich ist, daß sie gleichfalls auf elektromagnetischen Kräften beruhen.

Damit eine Energieübertragung als auf einer Strahlung im Aether beruhend betrachtet werden könne, muß jedenfalls die Geschwindigkeit ihrer Fortpflanzung mit der Lichtgeschwindigkeit übereinstimmen; abweichende Geschwindigkeiten können als ein triftiger Grund gegen die bezügliche Deutung gelten. Doch kommen noch andere Gesichtspunkte in Betracht.

Von den Kathodenstrahlen hat außer ihren wechselnden Geschwindigkeiten ihre Ablenkbarkeit durch elektrische und magnetische Felder bewiesen, daß sie kein Schwingungsvorgang sind, sondern Schwärme ausgesandter Elektronen. Dagegen stellen die Röntgenstrahlen und die mit ihnen gleichartigen γ-Strahlen, welche radioaktive Körper emittieren, wegen ihrer anscheinend der Lichtgeschwindigkeit gleichen Geschwindigkeit höchst wahrscheinlich elektromagnetische „Schwingungen" eigener Art dar. Die Röntgenstrahlen beruhen insbesondere auf der jähen Bewegungsänderung, welche in der Röntgenröhre die Elektronen der Kathodenstrahlen beim Auftreffen auf die Antikathode erleiden. Sie stellen sonach keinen stationären periodischen Schwingungszustand dar, sondern haben mehr den Charakter vereinzelter Stöße, und hierauf dürften ihre spezifischen Eigenschaften — besonders ein von Lichtstrahlen abweichendes Durchdringungsvermögen durch ponderable Körper beruhen. Aber sie ordnen sich nach allgemeinen Gesichtspunkten völlig den früher besprochenen im Aether verlaufenden elektromagnetischen Vorgängen zu; nach mathematischen Grundsätzen läßt sich überdies eine beliebige Reihe einzelner Stöße in eine Summe von periodischen Schwingungen auflösen (vgl. den Artikel „Fouriersches Theorem"), so daß ein direkter Zusammenhang herstellbar ist. Daß mit den Röntgenstrahlen Energie übertragen wird,

zeigen deren chemische und Fluoreszenz-Wirkungen.

3. **Moderne Bewegung zur Beseitigung der Aetherhypothese.** Das in sich so harmonisch abgeschlossene Gebäude der elektromagnetischen Aethertheorie hat in den letzten Jahren scharfe Angriffe zu erleiden gehabt. Gewisse sehr feine Beobachtungen über optische Erscheinungen an bewegten Körpern (vgl. dazu den Artikel „Lichtfortpflanzung in bewegten Medien") scheinen zur Erklärung die Annahme zu fordern, daß von einer im Aether sehr schnell und gleichförmig bewegten Lichtquelle das Licht sich für einen mit der Quelle bewegten Beobachter scheinbar nach allen Seiten hin — also insbesondere in der Bewegungsrichtung und der entgegengesetzten — gleich schnell fortpflanzt. Demgemäß könnte auch der Aether sich beliebig bewegen, ohne, daß ein Beobachter dies durch optische Beobachtungen feststellen könnte. Dies hat manche Forscher getrieben, die ganze Aetherhypothese für überflüssig und damit schädlich zu erklären („Relativitätstheorie"). Gewiß kann man die mathematischen Gesetze der Strahlung hinschreiben, ohne von der Aetherhypothese Gebrauch zu machen. Aber unser Bedürfnis nach plastischer Anschauung wird dadurch nicht befriedigt. Wir wollen wissen, wenn wir uns zu der Vorstellung eines absolut leeren Raumes bequemen sollen, wie nun in diesem Raume sich elektrische und magnetische Vorgänge abspielen, wie sich bezügliche Schwingungen mit einer für alle Vorgänge gleichen Geschwindigkeit ausbreiten können und müssen. Der einzige mögliche Weg, den auch die Vertreter des leeren Raumes eingeschlagen haben, ist die Rückkehr zu einer umgestalteten Emissionshypothese, die nur im Gegensatz zu der Newtonschen Hypothese nicht einzelne Partikeln, sondern ein räumlich ausgedehntes schwingendes Etwas durch der leeren Raum und zwar mit einer unter allen Umständen gleichen Geschwindigkeit transportiert denkt. Als Stütze für derartige Anschauungen gilt, daß die allgemeinen Gesetze der (Wärme- und Licht-)Strahlung (vgl. dazu den Artikel „Strahlung") sich bisher nur haben auf Grund der Annahme gewinnen lassen, es gäben emittierende Moleküle die Energie in individuellen und konstanten Elementarquanten, gewissermaßen atomistisch aus, derart etwa, daß nach Abgabe eines solchen Wirkungsquantums eine Pause bis zur Abgabe des nächsten einsetzt („Quantentheorie"). Es treten dann diese elementaren Energiequanten einigermaßen an Stelle der Newtonschen Lichtpartikeln.

Der heuristische Wert dieser Anschauungen hat sich in den letzten Jahren durch Aufdeckung bisher unbekannter Gesetzmäßigkeiten bedeutungsvoll erwiesen. Immerhin stellen sie eine prinzipielle Abkehrung von der gesamten neueren (Maxwellschen) Elektrodynamik dar, ohne bisher etwas ähnlich allgemein, in allen Gebieten Brauchbares an deren Stelle zu setzen. Die Zukunft muß lehren, ob sich eine Erweiterung der Maxwellschen Theorie finden läßt, welche die bisher ihr nicht unterworfenen (Strahlungs-)Erscheinungen einzubeziehen gestattet, oder ob von den neueren Gesichtspunkten aus eine vollständige neue Elektrodynamik aufgebaut werden kann.

Vorläufig wird der Gewinn an Anschaulichkeit, der darin liegt, im Aether ein den ponderabeln Körpern nach seinen elektromagnetischen Eigenschaften verwandtes Medium zu sehen, die Aetherhypothese wohl noch erfolgreich stützen.

Literatur. *Als solche kommt jede moderne Behandlung der Optik in Betracht. Es seien genannt:* ***P. Volkmann,*** *Optik. Leipzig 1891.* — ***P. Drude,*** *Optik. 3. Aufl. Leipzig 1910.* — ***M. Abraham,*** *Theorie der Elektrizität. Leipzig 1904/5.*

W. Voigt.

Strahlung.

Wärmestrahlung.

1. Elektromagnetische und Korpuskularstrahlung. 2. Strahlungsquellen. Temperaturstrahlung und Lumineszenzstrahlung. 3. Reflexion, Absorption, Durchlässigkeit und innere Diffusion. 4. Das Lambertsche Grundgesetz. Kosinusgesetz. Emissionsvermögen. 5. Das Kirchhoffsche Gesetz von der Emission und Absorption. Der absolut schwarze Körper. 6. Verwirklichung des schwarzen Körpers durch W. Wien und O. Lummer. 7. Spektralanalytische. Folgerungen aus dem Kirchhoffschen Gesetze. 8. Das Stefan-Boltzmannsche Gesetz der Gesamtstrahlung. 9. Energieverteilung im Spektrum des schwarzen Körpers. 10. Spektralgleichung für die Energieverteilung im Spektrum der schwarzen Strahlung. 11. Energieverteilung im Spektrum von reinem Platin und anderen edlen Metallen. 12. Oekonomie der Lichtquellen. Ziele der Leuchttechnik. 13. Die strahlungstheoretische Temperaturskala.

1. **Elektromagnetische und Korpuskularstrahlung.** Unter „Strahlung" im allgemeinsten Sinne versteht man die geradlinige Ausbreitung der Energie eines Körpers in Gestalt von „Strahlen", die auch den luftleeren Raum (Vakuum) durchdringen. Die Strahlung steht also im Gegensatz zur „Leitung", zu welcher die Mitwirkung eines materiellen Mediums erforderlich ist.

Bei der Strahlung haben wir 2 Arten zu unterscheiden, je nachdem die Energie vom strahlenden Körper in Gestalt geschleuderter Korpuskeln ausgesandt wird („Korpuskularstrahlung") oder durch das Vakuum in

Gestalt elektromagnetischer Wellen, Impulse usw. hinausgestrahlt wird („elektromagnetische Strahlung"). Zur Korpuskularstrahlung gehört die Kathodenstrahlung, die Kanalstrahlung, die α- und β-Strahlung radioaktiver Substanzen. Bei ihr wird die Energie vom strahlenden Körper in Gestalt geschleuderter Elektronen bezw. Ionen in den Weltenraum hinausgetragen. Hier haben wir es mit einer Strahlung in des Wortes wahrster Bedeutung zu tun, da z. B. bei den Kathodenstrahlen jedes geschleuderte Elektron eine geradlinige Bahn senkrecht zum strahlenden Flächenelement der Kathode beschreibt, also einen „Strahl" ausmacht analog dem Wasserstrahl. Mit dieser Korpuskularstrahlung hat sich der Artikel „Strahlung" nicht zu befassen. Vielmehr versteht man unter „Strahlung" schlechtweg die sehr viel länger bekannte Energiestrahlung, die von der Sonne und anderen Strahlungskörpern durch das Vakuum in Gestalt von Wellen der Umgebung zugestrahlt wird. Früher dachte man sich der Vorstellbarkeit wegen das Vakuum mit dem hypothetischen, vollkommen elastischen „Lichtäther" (Weltäther oder kurz Aether) ausgefüllt und dementsprechend sprach man von „Aetherwellen". Gemäß der Faraday-Maxwellschen Anschauung ist der Aether ein Isolator und dielektrisch polarisierbar (vgl. den Artikel „Weltäther"). Gemäß der Maxwellschen elektromagnetischen Lichttheorie hat man es bei dieser Energiestrahlung mit einem elektromagnetischen Vorgang zu tun und man spricht demgemäß von „elektromagnetischer" Strahlung in Gestalt „elektromagnetischer Wellen" (vgl. den Artikel „Strahlende Aetherenergie").

In diesem Artikel soll also lediglich von den Strahlungsvorgängen die Rede sein, die man früher als „Lichtstrahlung", „Wärmestrahlung", „ultraviolette Strahlung" usw. bezeichnete. Diese letztgenannten Strahlungsarten gehören insofern einheitlich zusammen, als sie mehr oder weniger zugleich von einer und derselben Strahlungsquelle (Sonne, Bogenlampe usw.) ausgesandt werden. Obgleich sich die von der Sonne und die von einem Hertzschen Oszillator ausgehende elektromagnetische Strahlung (vgl. den Artikel „Elektrische Schwingungen") lediglich durch die verschiedene Größe der sie transportierenden Aetherwellen unterscheiden, so sind sie doch durch die Art ihrer Erregung und die ihnen eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten so grundverschieden, daß es mehr als gewaltsam wäre, sie in einen Artikel zusammenzudrängen. Das gleiche gilt von der Röntgenstrahlung.

Wir übergehen die lange Reihe der schwierigen und wichtigen Untersuchungen, welche zum Zwecke hatten nachzuweisen, daß die Wärmestrahlen in jeder Hinsicht den Lichtstrahlen gleichen und wie diese nach denselben Gesetzen reflektiert, gebrochen, polarisiert und gebeugt werden. Insofern diesen verschiedenen Wellenarten das eine gemeinsam ist, daß ihre Strahlungsenergie von einem geeigneten Strahlungsempfänger (Bolometer, Thermosäule usw. vgl. den Artikel „Strahlungsmessung") in Wärme umgewandelt wird,[1]) wollen wir sie alle unter dem Namen „Wärmewellen" zusammenfassen und die sie verursachende Strahlung als „Wärmestrahlung" bezeichnen.

Daß die von einer „Strahlungsquelle" kommende „Wärmestrahlung" unter Umständen unser Auge als empfangenden Apparat zu erregen imstande sind, so daß die Strahlungsquelle zur „Lichtquelle" wird, ist eine Erscheinung sekundärer Art. Ebenso, daß die Wärmestrahlung bei genügender Kleinheit ihrer Wellenlänge die photographische Platte als Strahlungsempfänger zu erregen imstande sind, so daß sie zur Quelle „chemischer" Strahlen wird (vgl. den Artikel „Strahlungsumformung").

2. Strahlungsquellen. Temperaturstrahlung und Lumineszenzstrahlung. Je nach dem Zweck, den man bei der Erzeugung einer Strahlung verfolgt, ist auch die Art der Erzeugung eine verschiedene. Beim Ofen kann man der Lichtstrahlen entbehren, bei der Lichtquelle will man nur Strahlen, auf welche das Auge reagiert, bei der ultravioletten Strahlung sind die Lichtstrahlen und die Wärmestrahlen überflüssiger Ballast.

Es hat sich im Laufe der Entwickelung als zweckmäßig herausgestellt, zwei Arten der Erzeugung von Strahlungsenergie getrennt zu behandeln: Die „reine Temperaturstrahlung" und die „Lumineszenzstrahlung". Es ist leichter, diese beiden Strahlungsarten zu definieren, als in jedem Falle anzugeben, zu welcher der beiden Arten eine Strahlungsquelle gehört.

Temperaturstrahlung senden alle diejenigen Strahlungsquellen aus („Temperaturstrahler" nach Rob. v. Helmholtz), bei denen die Strahlungsenergie lediglich eine Folge der Temperatur des Körpers ist und konstant bleibt, wenn man lediglich durch Zufuhr von Wärmeenergie die durch Strahlung abströmende Energie ersetzen kann. Wohl sind es auch hier die Elektronen im im Atom, durch deren Schwingungen bezw. Rotationen der Aether erregt wird. Die Energie der Strahlung ist aber eine Folge der Molekularbewegung, also der Temperatur des Strahlungskörpers und nicht wie bei der Lumineszenz verursacht durch ein Bom-

[1]) Natürlich ist auch diese Eigenschaft den elektrischen Wellen und den Röntgenwellen eigen.

bardement der Atome durch geschleuderte Elektronen oder Ionen. Ueber den Mechanismus oder Ionen. Ueber den Mechanismus der Strahlungserregung läßt sich zurzeit nicht mehr aussagen. Eine mathematisch exakte Definition eines Temperaturstrahlers ist unter 6 gegeben. Als Temperaturstrahler sind der schwarze Körper (Abschnitt 5) und die meisten gebräuchlichen Lichtquellen (Glühlampe, Auerstrumpf, Kerze usw.) anzusprechen. Im Gegensatz zu der Lumineszenzstrahlung sind die Gesetze der Temperaturstrahlung fast bis in ihre letzten Konsequenzen erkannt. Es ist die Aufgabe künftiger Forschung, zu untersuchen, in welche Kategorie der Strahlung ein jeder Strahler gehört.

3. Reflexion, Absorption, Durchlässigkeit und innere Diffusion. Fällt die von einem Strahlungskörper ausgegangene Strahlung auf die Trennungsfläche zweier Medien, so wird im allgemeinen der eine Teil der Energie reflektiert, der andere dringt ins zweite Medium ein. Letzterer wird zum Teil in Wärmeenergie verwandelt („absorbiert"), zum Teil an den Teilchen des zweiten Mediums durch „Diffusion" zerstreut. Das herrliche Blau des Himmels ist eine Folge dieser Diffusion der Sonnenstrahlung an den in der Luft enthaltenen Staub- und Wasserdampfpartikelchen bezw. an den Luftmolekülen selbst. Nach Rayleigh ist diese Aufsplitterung des Lichtes („scattering of light") umgekehrt proportional der vierten Potenz der Wellenlänge, also bedeutend stärker für violette als rote Wellen. Daher die blaue Farbe des aufgesplitterten Lichtes („scattered light").

Alle „trüben" Medien zeigen die innere Diffusuion. Zu ihnen gehört staubgeschwängerte Luft sowohl wie das gewöhnliche Wasser; als Hauptrepräsentant darf das „Milchglas" gelten. Auch die Färbung des Rubinglases ist der Einlagerung der ultramikroskopischen Goldteilchen zu verdanken und der an diesen stattfindenden Diffusion des Lichtes.

Je nach der Beschaffenheit der Trennungsfläche beider Medien ist die Reflexion eine „regelmäßige" oder „diffuse". Eine regelmäßig spiegelnde Fläche geht in eine diffus reflektierende über, wenn man die Trennungsfläche (Oberfläche des zweiten Mediums) z. B. durch Aetzen ihrer Politur beraubt. Wir sehen hier von diesen Unterschieden ab und verstehen unter „Reflexionsvermögen" denjenigen Bruchteil der auffallenden Energie, welcher an der Trennungsfläche durch Reflexion (regelmäßig oder diffus) in das erste Medium zurückgeworfen wird. Da der reflektierte Anteil von der Wellenlänge der auffallenden Strahlung und der Temperatur des reflektierenden Körpers abhängt, so muß das Reflexionsvermögen ($R_{\lambda T}$) auf eine einzelne Wellenlänge λ und auf eine bestimmte Temperatur T des Körpers bezogen werden.

Unter „Absorptionsvermögen" ($A_{\lambda T}$) eines Körpers versteht man nach G. Kirchhoff denjenigen Bruchteil der auffallenden Energie der Wellenlänge λ, welchen der Körper bei der Temperatur T absorbiert und in Wärme umwandelt.

Das Absorptionsvermögen ist nicht zu verwechseln mit dem „Absorptionskoeffizienten" oder „Absorptionsindex", welcher sich nicht auf die auffallende, sondern auf die eindringende Energie bezieht. Je größer der Absorptionsindex ist, in umso dünnerer Schichtdicke wird die eindringende Energie vom absorbierenden Körper auf den gleichen Bruchteil geschwächt.

Unter „Durchlässigkeitsvermögen" ($D_{\lambda T}$) versteht man denjenigen Teil der auffallenden Energie, welcher aus dem Körper wieder austritt. Ist die auffallende Energie gleich Eins, so muß also gelten:

$$1 = R_{\lambda T} + A_{\lambda T} + D_{\lambda T} \quad . \; . \; . \; . \quad 1)$$

Ist der Körper nur dick genug, so wird schließlich $D_{\lambda T} = 0$. Dies findet bei Metallen schon in den dünnsten Schichten statt, da sie einen hohen Absorptionsindex besitzen. Dann gilt also:

$$A_{\lambda T} = 1 - R_{\lambda T} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 2)$$

Messen wir A und R in Prozenten der auffallenden Energie, so gilt:

$$A_{\lambda T} = \frac{100 - R_{\lambda T}}{100} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 3)$$

Bei allen Metallen ist das Reflexionsvermögen $R_{\lambda T}$ sehr groß; sie besitzen also ein relativ geringes Kirchhoffsches Absorptionsvermögen $A_{\lambda T}$, aber einen hohen Absorptionskoeffizienten.

4. Das Lambertsche Grundgesetz. Kosinusgesetz. Emissionsvermögen. Schon Prévost nahm an, daß die Bestrahlung zweier Körper eine gegenseitige ist. Die Größe dieser Bestrahlung hängt von zwei Faktoren ab, von der räumlichen Anordnung der sich bestrahlenden Körper (Entfernung, Größe usw.) und von der physikalischen Beschaffenheit der strahlenden Körper (Strahlungsintensität). Sie wird geregelt durch das Lambertsche Grundgesetz. Diesem liegen die folgenden Tatsachen bezw. Annahmen zugrunde:

1. Die Bestrahlung ist umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung.

2. Die Bestrahlung eines Flächenelementes ist proportional dem Kosinus des Einfallswinkels der Strahlen.

3. Das Flächenelement strahlt proportional dem Kosinus des Winkels, welchen das Lot des strahlenden Elementes mit der Richtung

der ausfahrenden Strahlen bildet („Ausstrahlungswinkel"). Dieses dritte Gesetz wird als „Kosinusgesetz" bezeichnet. Lambert erschloß dieses Gesetz aus der Beobachtung, daß eine leuchtende Kugel (glühende Eisenkugel, Mond, Sonne) als leuchtende Scheibe von überall gleicher Helligkeit, erscheint. Dieses Gesetz gilt streng nur für absolut diffus reflektierende Körper, nicht aber für spiegelnde Metalle.

Ist r in Figur 1 die Verbindungslinie

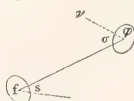


Fig. 1.

zwischen den Elementen f und φ, mit deren Loten sie die Winkel s bezw. σ bildet, so ist nach dem bisherigen zunächst die von f auf φ oder umgekehrt gestrahlte Energie proportional dem Quotienten $\frac{f.\varphi.\cos s.\cos\sigma}{r^2}$. Dies ist aber noch nicht der vollständige Ausdruck für die ganze auf das bestrahlte Flächenelement gesandte Strahlungsmenge. Denn es ist die Bestrahlung von φ z. B. ganz verschieden, je nachdem f der Sonne oder dem Monde oder einer anderen Lichtquelle angehört. Man multipliziert darum obigen Quotienten noch mit einem Faktor (J) und erhält für die z. B. auf φ auffallende Strahlungsmenge:

$$m = J . \frac{f.\varphi.\cos s.\cos\sigma}{r^2} \quad . . . (4)$$

Man nennt J die „Strahlungsintensität" des leuchtenden Flächenelementes f. Analog erhält man für die von φ auf f gestrahlte Gesamtmenge:

$$m' = J' . \frac{f.\varphi.\cos s.\cos\sigma}{r^2} \quad . . . (5)$$

wenn J' die Intensität von φ ist.

Dies ist der mathematische Ausdruck für das Lambertsche Grundgesetz (der Photometrie).

Gehören die Flächenelemente „Temperaturstrahlern" an, so ist die Strahlungsintensität J bezw. J' lediglich eine Funktion der Temperatur, der Wellenlänge der ausgesandten Strahlen und der physikalischen Natur der strahlenden Substanz. Die Strahlungsintensität ist laut Gleichungen 3 und 4 definiert als eine „Strahlungsmenge". Setzt man $s = \sigma = 0$ und $f = \varphi = r = 1$, so wird $m = J$ und $m' = J'$, d. h. „die Strahlungsintensität ist diejenige Strahlungsmenge, welche die Flächeneinheit normal auf die in der Entfernung Eins befindliche zur Strahlenrichtung senkrechte Flächeneinheit strahlt".

Als Emission $E_{\lambda T}$ eines Körpers mit der Oberfläche F bezeichnet man die von der ganzen Oberfläche F bei der absoluten Temperatur T für die Welle λ in der Zeiteinheit einseitig seiner ganzen Umgebung zugestrahlte Energie. Ist die Strahlungsintensität nach allen Richtungen dieselbe, d. h. ist das Kosinusgesetz erfüllt, so ist die Emission für die Flächeneinheit:

$$E_{\lambda T} = \pi J_{\lambda T} \quad . . . . . . (6)$$

welches wir schlechtweg als das Emissionsvermögen einer diffus strahlenden Oberfläche bezeichnen wollen.

Als Gesamtstrahlung werde die gesamte Emission der Flächeneinheit für alle Wellen bezeichnet und ausgedrückt durch das Zeichen:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = \pi \int_0^\infty J_\lambda d\lambda \Big|_T \quad . . (7)$$

Gewöhnlich gibt man das Emissionsvermögen oder die gesamte Emission für den besonderen Fall an, daß die Flächeneinheit eines Körpers von der absoluten Temperatur 1° (— 272° C) einseitig gegen eine Hülle von der Temperatur 0° absolut (— 273° C) strahlt. Das im absoluten Maße gemessene Emissionsvermögen werde als das „absolute Emissionsvermögen" bezeichnet.

Da man den Meßapparat nicht auf die absolute Nulltemperatur bringen kann, so ist das absolute Emissionsvermögen eines Körpers auch nicht direkt zu bestimmen. Wohl aber erhält man seine Größe aus der Strahlungsmessung bei beliebiger Temperatur, wenn man das Gesetz kennt, nach dem sich das Emissionsvermögen mit der Temperatur ändert.

5. Das Kirchhoffsche Gesetz von der Emission und Absorption. Der absolut schwarze Körper. Die Gesetze der Temperaturstrahlung sind vollkommen bestimmt, wenn man die Abhängigkeit des Emissionsvermögens eines jeden Temperaturstrahlers von der Wellenlänge und der Temperatur kennt. Bei der großen Zahl der in Betracht kommenden Substanzen wäre diese Aufgabe kaum lösbar, wenn nicht Gesetzmäßigkeiten aufgefunden worden wären, welche die verschiedensten Strahlungskörper umfassen und so die große Mannigfaltigkeit der Körperwelt allgemeineren Prinzipien unterordneten. Das oberste dieser allumfassenden Gesetze ist das Kirchhoffsche „Gesetz von der Absorption und Emission des Lichtes" (1859), bewundert wegen der wichtigen Folgerungen, welche Kirchhoff daraus in bezug auf die physikalische Beschaffenheit der Sonne und der Fixsterne zog und inbezug auf seine strahlungstheoretische Bedeutung.

Schon vor Kirchhoff hatte man auf

Grund von Versuchen über die relativen Emissionsvermögen der verschiedensten Körper und ihre Absorptionseigenschaften gefolgert, daß die Substanzen vornehmlich diejenige Strahlung absorbier n, die sie selbst bei hoher Erhitzung emittieren. Gleichwohl gebührt Kirchhoff das volle Verdienst in bezug auf das nach ihm benannte Gesetz, da es erst durch ihn seine richtige Formulierung, seine theoretische Begründung für jede einzelne Wellenlänge und seine Beschränkung auf die reine Temperaturstrahlung erhalten hat. Bei der theoretischen Herleitung seines Gesetzes führt Kirchhoff den „absolut schwarzen Körper" ein und definiert als solchen „einen Körper, der alle auf ihn fallenden Strahlen absorbiert, also Strahlen weder reflektiert, noch solche hindurchläßt".

Bedeuten E_λ und A_λ das Emissions und Absorptionsvermögen eines beliebigen Temperaturstrahlers und S_λ das Emissionsvermögen des wenigstens „denkbaren", absolut schwarzen Körpers, alle drei Größen bezogen auf die gleiche Wellenlänge und die gleiche Temperatur, so lautet das Kirchhoffsche Gesetz:

$$\frac{E_{\lambda T}}{A_{\lambda T}} = \text{Const.} = S_{\lambda T} \text{ oder } \left[\frac{E}{A} = S\right]_{\lambda T} \quad . \ . \ (8)$$

wo die eckige Klammer mit dem Index λT aussagen soll, daß alle Größen sich auf die gleiche Wellenlänge λ und die gleiche Temperatur T beziehen sollen.

Das Kirchhoffsche Gesetz sagt also nicht nur aus, daß bei allen Temperaturstrahlern gleicher Temperatur das Verhältnis von Emissions- zu Absorptionsvermögen derselben Wellenlänge gleich ein und derselben Konstanten sei, sondern außerdem, daß der Wert dieser Konstanten stets gleich dem Emissionsvermögen des absolut schwarzen Körpers für die gleiche Wellenlänge und bei der gleichen Temperatur sein soll.

Hierdurch sind also die Strahlungsgesetze aller Temperaturstrahler auf dasjenige des vollkommen schwarzen Körpers zurückgeführt. Ist dieses bekannt, so erhält man mit Hilfe des Absorptionsvermögens $A_{\lambda T}$ eines beliebigen Körpers auch dessen Strahlungsgesetz. Für undurchlässige Substanzen wie die Metalle nimmt das Kirchhoffsche Gesetz die Form an:

$$E_{\lambda T} = (1 - R_{\lambda T}) S_{\lambda T} \quad . \ . \ . \ . \ (9)$$

Bei ihnen genügt die Bestimmung des Reflexionsvermögens $R_{\lambda T}$, um ihr Emissionsvermögen $E_{\lambda T}$ relativ zu demjenigen des schwarzen Körpers $S_{\lambda T}$ zu finden.

Es kam also vor allem darauf an, den absolut schwarzen Körper zu verwirklichen und seine Strahlungsgesetze zu ermitteln.

6. Verwirklichung des schwarzen Körpers durch W. Wien und O. Lummer. Wir übergehen die älteren Versuche über die Strahlung der verschiedensten Substanzen, da sie in keiner Beziehung zur Strahlung des schwarzen Körpers stehen. Das Interesse für die Verwirklichung der „schwarzen Strahlung" wurde erst geweckt durch die theoretische Herleitung Boltzmanns (1884) des Gesetzes für die Gesamtstrahlung des schwarzen Körpers (vgl. Abschnitt 8) und die Ableitung der auf das Energiemaximum bezüglichen Gesetze der spektral zerlegten schwarzen Strahlung durch W. Wien (1893). Die Verwirklichung absolut schwarzer emittierender und absorbierender Körper datiert seit 1895, in welchem Jahre Lummer und Wien eine praktisch brauchbare Methode publizierten, die schwarze Strahlung mit beliebig großer Annäherung an die Definition dem Experimente zugänglich zu machen.[1])

Laut Definition soll der absolut schwarze Körper bei jeder Temperatur alle auf ihn auffallende Strahlung beliebiger Wellenlänge vollkommen absorbieren, also Strahlen weder reflektieren noch hindurchlassen.

Ein solcher Körper kann in der Natur nicht existieren. Wohl ist es leicht zu bewirken, daß ein Körper keine Strahlung hindurchläßt. In diesem Falle gilt die Gleichung (9). Damit dieser Körper wie ein schwarzer strahlt, müßte also $R_{\lambda T} = 0$ sein, da nur dann $E_{\lambda T} = S_{\lambda T}$ würde. Da aber das Reflexionsvermögen $R_{\lambda T}$ vom Brechungsquotienten abhängt und jeder Körper Dispersion zeigt, so ist die Bedingung $R_{\lambda T} = 0$ schlechterdings unerfüllbar.

Ein frei strahlender Körper kann somit den Bedingungen des absolut schwarzen Körpers nicht gerecht werden, da er immer wenigstens einige Wellensorten mehr oder weniger stark reflektiert.

Freilich kommen einzelne Substanzen, wie Kohlenruß und Platinmohr der Definition des schwarzen Körpers schon sehr nahe, da sie die sichtbaren Wellen fast gar nicht reflektieren (daher wir sie als „schwarz" bezeichnen) und auch die langen Wärmewellen noch recht gut absorbieren. Nur haben diese Substanzen den großen Fehler, daß sie keine hohen Temperaturen aushalten, da Ruß bei etwa 400°C verbrennt und Platinmoor bei etwa 600° C sich in blankes Platin umwandelt. Blankes Platin und alle edlen Metalle sind aber weit davon entfernt, wie der schwarze Körper zu strahlen, da ihr Reflexionsvermögen für alle Wellen und

[1]) In bezug auf die geschichtliche Entwickelung sei verwiesen auf den Aufsatz des Verfassers „Geschichtliches zur Verwirklichung der schwarzen Strahlung", Naturw. Rundschau 11 Nr. 6, 7 und 8, 1895 und auf dessen Artikel „Sur le rayonnement des corps noirs". Rapport présenté au Congrès intern. de physique Paris 1900, Gauthier-Villars, Tome II p. 41 bis 99.

bei allen Temperaturen sehr groß ist. Ist für einen Körper (z. B. Platin) $R_\lambda = 0,9$, d. h. werden 90% der ankommenden Strahlungsmenge reflektiert, so ist sein Absorptionsvermögen $A_\lambda = 0,1$ und demnach sein Emissionsvermögen E_λ für die betreffende Strahlensorte λ gemäß dem Kirchhoffschen Gesetz:

$$E_\lambda = A_\lambda . S_\lambda = 0,1\, S_\lambda,$$

also nur $^1/_{10}$ desjenigen des schwarzen Körpers. Um das blanke Platin zu einem besseren Strahler zu machen, überzieht man seine Oberfläche mit unverbrennlichen Substanzen (Eisenoxyd, Uranoxyd usw.), welche ein größeres Absorptionsvermögen haben. Da man auf solche Weise aber niemals $R_\lambda = 0$ und $A_\lambda = 1$, also auch nicht $E_\lambda = S_\lambda$ machen kann, so verfährt man indirekt und benutzt das Reflexionsvermögen eines Körpers, um ihn künstlich zum schwarzen Körper zu machen: Man bewirkt, daß alle auffallende Strahlung infolge mehrfacher Reflexion absorbiert und das Reflexionsvermögen wenigstens scheinbar gleich Eins gemacht wird.

Es wird dies verständlich durch die Figur 2, in welcher B eine Hohlkugel aus blankem Metall mit einer Oeffnung A vosrtellt. Ein durch diese eintretender Strahl SA wird im Inneren bei p, q, r usw. so oft reflektiert, ehe er wieder die Oeffnung A trifft, daß er vollkommen absorbiert wird. Gemäß dem Kirchhoffschen Gesetz muß also auch ein aus dem Inneren längs pAS′ austretender Strahl die schwarze Strahlung transportieren und zwar von der Temperatur des strahlenden Hohlraums, wobei die Bedingung erfüllt sein muß, daß die Hohlkugel überall die gleiche Temperatur besitzt und ihre Wandung für Strahlung undurchlässig ist.

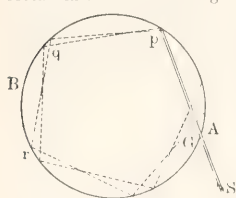


Fig. 2.

Auf Grund solcher Ueberlegungen gelangten W. Wien und O. Lummer 1895 zu der folgenden Konsequenz:

Um die Strahlung des schwarzen Körpers in beliebiger Annäherung herzustellen, „muß man einen Hohlraum auf möglichst gleichmäßige Temperatur bringen und durch eine Oeffnung seine Strahlung nach außen gelangen lassen“.

Dabei wird man natürlich die innere Wandung des Hohlraums schon an und für sich so schwarz, d. h. gut absorbierend wie möglich machen.

Um zu ergründen, inwieweit die aus der Oeffnung des Hohlraums kommende Strahlung „schwarz“ ist, kann man folgendermaßen zu Werke gehen. Man sendet durch die Oeffnung von außen Strahlung in das Innere des Hohlraums und sieht zu, wieviel Strahlung aus dem Hohlraum durch die Oeffnung nach außen gelangt.

Es ist merkwürdig, daß diese Folgerung von weittragender Bedeutung erst so spät gezogen bezw. realisiert wurde, wenn man bedenkt, daß Kirchhoff schon bei Ableitung seines Gesetzes es ausgesprochen hatte:

„Wenn ein Raum von Körpern gleicher Temperatur umschlossen ist und durch diese Körper keine Strahlen hindurchdringen können, so ist ein jedes Strahlenbündel im Innern des Raums seiner Qualität und Intensität nach gerade so beschaffen, als ob es von einem vollkommen schwarzen Körper derselben Temperatur herkäme, ist also unabhängig von der Beschaffenheit und Gestalt der Körper und nur durch die Temperatur bedingt.“

Gleichwohl zog Kirchhoff aus seiner „Hohlraumtheorie“ nicht die Folgerung der praktischen Verwirklichung der schwarzen Strahlung, obwohl er von der hohen Bedeutung dieser experimentellen Verwirklichung durchdrungen war, wie aus den Schlußworten seiner berühmten Abhandlung hervorgeht: „Es ist eine Aufgabe von hoher Wichtigkeit, diese Funktion zu finden. Der experimentellen Bestimmung derselben stehen große Schwierigkeiten im Wege; trotzdem scheint die Hoffnung gegründet, sie durch Versuche ermitteln zu können, da sie unzweifelhaft von einfacher Form ist, wie alle Funktionen es sind, die nicht von den Eigenschaften einzelner Körper abhängen, und die man bisher kennen gelernt hat. Erst wenn diese Aufgabe gelöst ist, wird die ganze Fruchtbarkeit des bewiesenen Satzes sich zeigen können.“

Erst seit der Verwirklichung der schwarzen Strahlung durch Wien und Lummer datieren unsere Kenntnisse der schwarzen Strahlungsgesetze. Eine wichtige Eigenschaft des gleichtemperierten Hohlraums sei hier noch erwähnt, daß nämlich alle individuellen Strahlungsverschiedenheiten der Temperaturstrahler verschwinden müssen, wenn man sie in das Innere des Hohlraums bringt und dafür sorgt, daß sie dessen Temperatur annehmen. Auf diese Weise konnte St. John nachweisen, daß die Substanz des Auerstrumpfes ein Temperaturstrahler ist, da sich seine Emission im Hohlraum von diesem nicht abhebt.

Auf die gleiche Weise ist es neuerdings Gibson gelungen (Breslauer Dissert. 1911) nachzuweisen, daß auch die grüne Strahlung des Thalliumdampfes zur reinen Temperaturstrahlung gehört. Somit führt die Theorie von der Hohlraumstrahlung

zu einem untrüglichen Kriterium zur Unterscheidung zwischen Temperatur- und Lumineszenzstrahlung. Denn alle auf Lumineszenz beruhenden Strahler müssen, falls man sie in einem gleichtemperierten Hohlraum zum Leuchten bringen kann, eine gegenüber der Hohlraumstrahlung erhöhte Emission zeigen.

7. Spektralanalytische Folgerungen aus dem Kirchhoffschen Gesetze. Die von Kirchhoff und Bunsen im Jahre 1860 begründete Spektralanalyse beruht auf der von ihnen entdeckten Tatsache, daß jedem Element, im dampfförmigen Zustande zum Leuchten gebracht, ein individuelles, diskontinuierliches Emissionsspektrum („Linienspektrum") zukommt. Es ist bekannt, daß mittels der Spektralanalyse eine ganze Anzahl neuer Elemente entdeckt wurde.

Mit Hilfe des Kirchhoffschen Gesetzes von der Emission und Absorption des Lichtes lassen sich sehr interessante Folgerungen ziehen, die zum großen Teil schon von Kirchhoff selbst herrühren.

Uebertragen wir dieses Gesetz auf die durch Temperatursteigerung leuchtend gewordenen Körper, so lehrt dasselbe, daß bei noch so hoer Temperatur alle die Körper nicht leuchten, welche bei dieser Temperatur die Lichtstrahlen ungeschwächt hindurchtreten lassen oder sie reflektieren, anstatt sie zu verschlucken. Hierin liegt die Erklärung dafür, daß die durchsichtigen Gase der Bunsen- und Knallgasflamme trotz ihrer hohen Temperatur nicht leuchten, während die stark absorbierende Kohle schon bei relativ niedriger Temperatur „weißes" Licht, d. h. alle Lichtstrahlen aussendet.

Umgekehrt kann man aus der Emission eines Temperaturstrahlers auf seine Absorption schließen. Indem Kirchhoff als selbstverständlich voraussetzte, daß die Strahlung der in der Bunsenflamme zum Leuchten gebrachten Substanzen wie Natrium, Strontium usw. zur Temperaturstrahlung gehörig seien, schloß er aus seinem Gesetz, daß z. B. eine Natriumflamme, da sie vorzugsweise gelbe Strahlen emittiert, auch diese gelben Strahlen absorbiert, also im Spektrum einer hocherhitzten weißen Lichtquelle eine dunkle Absorptionslinie erzeugen müsse, da wo die Natriumflamme als alleinige Quelle eine gelbe Linie (gelbes Abbild des Spaltes) erzeugen würde. Diese Folgerung konnte Kirchhoff tatsächlich experimentell erhärten, woraus er weiter schloß, daß die im Sonnenspektrum sichtbaren Fraunhoferschen Linien auf die Absorption leuchtender Dämpfe in der Sonnenatmosphäre zurückzuführen seien und daß die Sonne einen hochtemperierten weißleuchtenden Kern besitzen müsse, der von glühenden Dämpfen und leuchtenden Gasen umgeben sei.

Diese Theorie von der „Umkehrung der Spektrallinien" und der physikalischen Konstitution der Sonne (und Fixsterne) machte um so größeres Aufsehen, als sie der allgemein angenommenen Herschelschen Theorie vom dunklen Sonnenkern diametral entgegenlief und außerdem lehrte, daß auf der Sonne alle jene irdischen Substanzen (in Dampfform) vorhanden sein müssen, deren Emissionslinien mit solchen der Fraunhoferschen Linien im Sonnenspektrum koinzidieren.

Sehen wir zu, inwieweit diese Schlußfolgerungen Kirchhoffs berechtigt sind. Tatsächlich wissen wir heute, daß das Licht der gefärbten Bunsenflamme auf reiner Temperaturstrahlung beruht.[1]) Demnach ist auf die Emissionsspektra dieser gefärbten Bunsenflammen das Kirchhoffsche Gesetz in voller Strenge anwendbar. Diese gefärbten Flammen müssen also nicht nur diejenigen Strahlensorten vorzugsweise absorbieren, welche sie emittieren, sondern die Größe ihres Absorptionsvermögens steht auch gemäß dem Kirchhoffschen Gesetze in ganz gewissem quantitativem Verhältnis zur Größe ihres Emissionsvermögens.

Was den Kirchhoffschen Schluß in bezug auf die Entstehung der Fraunhoferschen Linien im Sonnenspektrum und auf die hohe Temperatur des Sonnenkerns anlangt, so schwebt dieser so lange in der Luft, als nicht nachgewiesen ist, daß auch die auf der Sonne leuchtenden Dämpfe und Gase zur reinen Temperaturstrahlung gehören. Eindeutige Schlüsse auf die Temperatur des umkehrenden Körpers können nur gezogen werden, wenn dieser wie ein schwarzer Körper strahlt und außerdem die umkehrende Flamme zu den Temperaturstrahlern gehört. Dies geht aus der folgenden Betrachtung hervor: In Figur 3 bedeutet L den umkehrenden schwarzen Körper und l die umkehrende gefärbte Bunsenflamme,

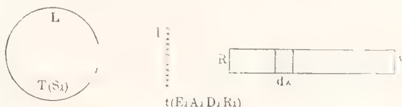


Fig. 3.

RV das Spektrum der durch die Flamme gegangenen schwarzen Strahlung. Es sollen die Bedingungen gefunden werden dafür, daß im Spektrum weder eine helle, noch eine dunkle Linie ($d\lambda$) gesehen werde.

Es habe der schwarze Körper die Tem-

[1]) Dies geht vor allem aus einer demnächst erscheinenden Breslauer Dissertation von Frl. Cohn hervor.

peratur T und für die Wellenlänge λ (Spektralbezirk $d\lambda$) das Emissionsvermögen $S_{\lambda T}$. Die Flamme l habe die Temperatur t und in bezug auf die gleiche Welle λ das Emissionsvermögen $E_{\lambda t}$, das Reflexionsvermögen $R_{\lambda t}$, das Absorptionsvermögen $R_{\lambda t}$ und das Durchlässigkeitsvermögen $D_{\lambda t}$.

Nach dem Kirchhoffschen Gesetz gilt für die temperaturstrahlende Flamme jedenfalls:

$$[E_\lambda = A_\lambda S_\lambda]_t \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; (a)$$

wenn unter $S_{\lambda t}$ die schwarze Strahlung bei der Flammentemperatur t verstanden wird. Andererseits erhält die Stelle $d\lambda$ erstens infolge der Eigenstrahlung von l die Energie $E_{\lambda t}$ und außerdem die Menge $S_{\lambda T} . D_{\lambda t}$ also im ganzen:

$$E_{\lambda t} + S_{\lambda T} D_{\lambda t}$$

oder da wir stets den gleichen Bezirk betrachten wollen, so können wir den Index λ fortlassen und erhalten:

$$E_t + S_T D_t$$

Damit die Stelle bei $d\lambda$ ebenso hell ist wie in dem Falle, wo die Flamme l gar nicht da wäre, muß diese Größe gleich sein S_T; damit die „Linie" bei $d\lambda$ verschwindet, muß also gelten:

$$E_t + S_T D_t = S_T$$

welche Bedingung infolge der Beziehung (a) wird:

$$A_t S_t + S_T D_t = S_T.$$

Da stets:

$$A_t + R_t + D_t = 1$$

so erhält man:

$$S_T = A_t S_t + S_T(1 - A_t - R_t),$$

d. h.

$$S_T = S_T - A_t(S_T - S_t) - R_t S_T$$

Diese Bedingung wird erfüllt, falls

$$S_T = S_t$$

und

$$R\,S_T = 0$$

ist, d. h. sobald $T = t$ und $R_t = 0$ ist. Unser Resultat lautet also: Nur wenn die Flamme l und der umkehrende schwarze Körpers L die gleiche Temperatur haben und das Reflexionsvermögen der Flamme gleich Null ist, verschwindet die Spektrallinie der Flamme auf dem kontinuierlichen Spektrum des schwarzen Körpers.

Ist der schwarze Körper höher temperiert als die Flamme, so erscheint die Linie dunkel auf hellem Grunde („Umkehrung der Spektrallinie"), ist aber die Flamme höher temperiert, so hebt sich die Linie hell vom Spektrum ab. Diese Folgerung gilt nicht mehr, wenn die das Linienspektrum emittierende Quelle nicht zur reinen Temperaturstrahlung gehört, da dann auf sie das Kirchhoffsche Gesetz nicht mehr angewendet werden darf. Inwieweit aber die Emissionslinien der Sonnenkorona ihr Entstehen der reinen Temperaturstrahlung verdanken, darüber fehlt uns jedes Urteil. Aus der Existenz der Fraunhoferschen Linien im Sonnenspektrum auf die Temperatur des Sonnenkerns zu schließen, ist also mindestens gewagt.

Falls das Liniensprektum eine Folge der Temperaturstrahlung ist, müssen bei gleicher Temperatur des umkehrenden schwarzen Körpers und der Strahlungsquelle gleichzeitig alle Linien im Spektrum verschwinden, während bei der Lumineszenzstrahlung die eine Linie verschwunden sein, eine andere sich hell, eine dritte sich dunkel abheben kann. Aber auch in manchen Fällen von Lumineszenz ist ein weitgehender Parallelismus zwischen der Lumineszenz- und der Temperatustrahlung zu erwarten und zu konstatieren. So ist bei den Lumineszenzerscheinungen in Geißlerschen Röhren, bei der Funken- und Bogenentladung, bei denen die Erregung der Schwingungen von elektrischen Vorgängen abhängt und nicht von rein thermischen Bedingungen, beobachtet worden, daß häufig die relative Intensität der kurzwelligen Strahlung gegenüber derjenigen der langwelligen mit der Stärke der der Erregung zunimmt — analog wie bei der Temperaturstrahlung mit steigender Temperatur. Hier wird nach Pringsheim ebenfalls eine Beziehung zwischen $E\lambda$, $A\lambda$ und S_λ bestehen können, aber von der Form:

$$\left[\frac{E_\lambda}{A_\lambda}\right]_T = S_{\lambda T} \quad . \; . \; . \; (10)$$

wo jetzt die Temperatur T der Strahlungsquelle eine andere ist als diejenige T′ des schwarzen Körpers. Von reiner Temperaturstrahlung kann hierbei keine Rede sein, da diese erheischt, daß $T' = T$ ist. E. Pringsheim definiert die Temperatur T′ des schwarzen Körpers, für welche die Beziehung . . . in bezug auf einen Strahlungskörper gilt, als dessen „spezifische Temperatur". Die Differenz zwischen der spezifischen und der wahren Temperatur des Strahlers gibt dann also ein Maß für die Größe der Abweichung der betreffenden Strahlung vom Kirchhoffschen Gesetz bezw. von der wahren, thermisch bestimmten Temperaturstrahlung. Bei Lichtquellen, bei denen es nicht möglich ist, eine bestimmte Temperatur des strahlenden Körpers thermisch festzustellen, ist es gegenstandslos, von der Gültigkeit des Kirchhoffschen Gesetzes und von Temperaturstrahlung zu sprechen. Demnach sind hiernach die Erscheinungen der Fluoreszenz und Phosphoreszenz und die Woodschen Resonanzspektra der Gase von jeder Gesetzmäßigkeit ausgenommen und tatsächlich ist bei diesen Vorgängen keine Spur einer Analogie mit der schwarzen Strahlung beobachtet worden.

Wie schon erwähnt, kann aus den Fraunhoferschen Linien kein eindeutiger Schluß auf die Größe der Temperatur der Sonnenmitte noch auf die Konstitution der Sonne gezogen werden. Nachdem man inzwischen aus der Größe der Sonnenstrahlung unter Benutzung der Strahlungsgesetze des schwarzen Körpers die Sonnentemperatur auf über 6000 Grad feststellen konnte, mußte auch die Kirchhoffsche Folgerung, daß die Sonne eine feurige Kugel mit leuchtender dampfförmiger Atmosphäre sei, fallen gelassen werden. Wir nehmen heute mit Schmidt an, daß die Sonne ein Dampf- oder Gasball sei mit nach der Mitte stetig zunehmender Dampfdichte und daß die Fraunhoferschen Linien eine Folge der anomalen Dispersion in lokalen Unstetigkeiten der Dampfdichte sind (vgl. den Artikel „Physik der Sonne").

So erkennt man, daß die Verwirklichung der schwarzen Strahlung und die Kenntnis ihrer Gesetzmäßigkeiten auch auf diesem astrophysikalischen Gebiete vor Trugschlüssen zu warnen und bisherige Irrtümer zu zerstreuen, die Hand geboten hat.

8. Das Stefan-Boltzmannsche Gesetz der Gesamtstrahlung. Ehe man noch die von einem Körper ausgestrahlte Energie zu messen verstand, hatte man aus der Abkühlungsgeschwindigkeit eines Körpers Schlüsse auf das Gesetz der Ausstrahlung zugewinnen gesucht. Seit Newton nahm man an, daß der Wärmeverlust einfach proportional sei der Temperaturdifferenz zwischen den sich bestrahlenden Körpern. Daß dieses Newtonsche Abkühlungsgesetz aber nur für relativ kleine Temperaturdifferenzen gültig sei, wurde schon von Martin, Erxleben und Delaroche nachgewiesen, ohne daß sie ein anderes Gesetz an seine Stelle setzten. Umfangreiche Untersuchungen über ein größeres Temperaturintervall stellten Dulong und Petit an. Sie ließen ein hoch erhitztes Thermometer in einer kupfernen Hohlkugel von konstanter Temperatur strahlen und beobachteten die Abkühlungsgeschwindigkeit.

Bei diesen Versuchen ist die Abkühlungszeit infolge Leitung der Luft fehlerhaft bestimmt. Dieser Fehler wird erst bei sehr kleinen Drucken, also bei guter Evakuierung unmerklich, wie Kundt und Warburg zu zeigen verstanden. Wir übergehen die vielen Arbeiten, welche nach dieser Methode angestellt worden sind.

Vom Glück begünstigt war J. Stefan, als er auf Grund einer kritischen Studie der bis 1879 vorliegenden Arbeiten das Gesetz aufstellte, „daß die Gesamtstrahlung eines Körpers proportional ist der vierten Potenz seiner absoluten Temperatur".

Nachdem das Stefansche Gesetz in solcher Form als „das" Gesetz der Strahlung aufgestellt war, sind alle experimentellen Arbeiten über die Strahlung darauf gerichtet, die Richtigkeit dieses Gesetzes zu prüfen.

Wir übergehen die zahlreichen Untersuchungen bis 1884, in welchem Jahre Boltzmann unter Benutzung des Bartolischen Theorems auf theoretischem Wege ableitete, daß das Stefansche Gesetz nur für den schwarzen Körper Gültigkeit haben kann. Das „Stefan-Boltzmannsche" Gesetz sagt demnach aus, daß die Gesamtstrahlung des schwarzen Körpers proportional der vierten Potenz der absoluten Temperatur ist und lautet in mathematischer Form:

$$S_T = \int_0^\infty S_\lambda d\lambda = \sigma . T^4 \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

wenn mit S_T die Gesamtstrahlung des schwarzen Körpers bei der absoluten Temperatur T und mit σ eine Konstante bezeichnet wird.

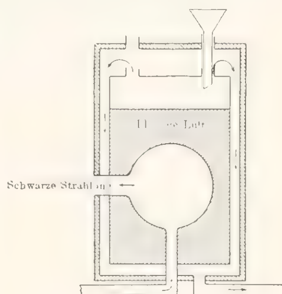


Fig. 4.

Erwähnt seien nur die Paschenschen Arbeiten, welche sich auf die Strahlung der verschiedensten Substanzen (blanke und mit Ruß, Kupferoxyd usw. überzogene Platinstreifen) beziehen und es wahrscheinlich machten, daß der schwarze Körper jedenfalls das Stefan-Boltzmannsche Gesetz befolgen werde (1897/1898).

An schwarzen Körpern wurde das Stefan-Boltzmannsche Gesetz zum ersten Male von Lummer-Pringsheim geprüft (1899), deren Versuchsresultate in der Tabelle I niedergelegt sind. Als scharze Körper wurden Hohlräume nach Lummer-Wien benutzt, die von flüssiger Luft (Fig. 4) aber Wasserdampf umspült waren, oder in einem Salpeterbad oder in einem geeigneten Chamotteofen erhitzt wurden. Zur Temperaturmessung dienten Thermometer und Thermoelemente. Als Strahlungsmesser

Tabelle I.

1. Schwarzer Körper	2. Absolute Temperatur beobachtet	3. Reduzierter Ausschlag	4. $\sigma\ 10^{10}$	5. Absolute Temperatur berechnet	6. T beob. — T berechnet
Siedetopf	373,1	156	127	374,6	— 1,5°
Salpeterkessel	492,5	638	124	492,0	+ 0,5
,,	723,0	3 320	124,8	724,3	— 1,3
,,	745	3 810	126,6	749,1	— 4,1
Schamotteofen	810	5 150	121,6	806,5	+ 3,5
,,	868	6 910	123,3	867,1	+ 0,9
,,	1378	44 700	124,2	1379	— 1
,,	1470	57 400	123,1	1468	+ 2
,,	1497	60 000	120,9	1488	+ 9
,,	1535	67 800	122,3	1531	+ 4
			Mittel 123,8		

wurde das mit Platinmohr geschwärzte Lummer-Kurlbaumsche Flächenbolometer benutzt.

Die in Kolumne 2 angegebenen Temperaturen sind bezogen auf die Temperaturskala von Holborn und Day, bei welcher die thermoelektromotorische Kraft des Le Chatelierschen Elementes aus Platin und Platinrhodium an das Stickstoffthermometer angeschlossen ist. Die dritte Kolumne enthält die Strahlungsenergie des schwarzen Körpers bei der beobachteten Temperatur in Gestalt des bolometrisch gemessenen und auf gleiches Maß reduzierten Ausschlages am Galvanometer. Dieser ist notwendig gleich Null, falls der schwarze Körper die gleiche Temperatur wie das Bolometer hat. Letztere betrug 17° C oder 290° absolut. Soll also das Stefansche Gesetz erfüllt sein, so muß gelten:

$$A = \sigma (T^4 - 290)^4,$$

falls A den reduzierten Ausschlag und T die absolute Temperatur des schwarzen Körpers bedeuten. Der für jede Temperatur gefundene Wert von σ multipliziert mit 10^{10} ist in Kolumne 4 angegeben, welche lehrt, wie außerordentlich konstant σ für alle Temperaturen ist. Ein noch besseres Kriterium für die Richtigkeit des Stefanschen Gesetzes erhält man, wenn man mit dem Mittelwert von σ aus der obigen Gleichung den Wert von T berechnet (vgl. Kolumne 5) und die Differenz zwischen dem beobachteten und berechneten Wert bildet, wie es in der letzten Kolumne geschehen ist. Die Zahlen der Kolumne 6 zeigen, daß sich die Abweichungen der Resultate vom Stefanschen Gesetz schon durch relativ kleine Fehler in der Temperaturbestimmung würden erklären lassen.

Diese Versuche bestätigten somit die Richtigkeit des Stefanschen Gesetzes. Unter Voraussetzung dieses Gesetzes hätten sie sogar dazu dienen können, eine wahrscheinliche Korrektion für die ältere Temperaturskala aufzustellen, welche von Holborn und Wien durch Anschluß des Le Chatelierschen Thermoelementes an das Luftthermometer gewonnen worden war.

Was durch die direkte Messung der Gesamtstrahlung erwiesen ist, wird bestätigt durch die später ausgeführten Beobachtungen im Spektrum (siehe Abschnitt 9).

Die Versuche mit dem in Figur 4 abgebildeten, von flüssiger Luft umspülten schwarzen Körper zeigten, daß das Stefan-Boltzmannsche Gesetz auch bis zur Temperatur —180° C gültig ist.

Um dieses Gesetz bis zu höheren Temperaturen prüfen zu können, als es der mit Gas geheizte Schamotteofen erlaubte, konstruierten Lummer-Kurlbaum den in Figur 5a und 5b abgebildeten sogenannten „elektrisch geglühten" absolut schwarzen Körper.

Ein etwa 0,01 mm dickes Platinblech wird zu einem Zylindermantel von 4 cm Durchmesser und 40 cm Länge geformt; an die verdickten Rohrenden sind die Zuleitungsbleche bei P (Fig. 5a) geschweißt, die zu den Klemmbacken K des Stativs führen, denen der elektrische Strom durch dicke Kabel zugeführt wird.

In diesen Heizmantel aus dünnem Platinblech paßt eng anschließend das innere der beiden in Figur 5b im Längsschnitt gezeichneten Rohre aus schwer schmelzbarer Masse, dessen Hohlraum die schwarze Strahlung liefern soll.

Dieses von der Kgl. Porzellanmanufaktur in Charlottenburg hergestellte Rohr trägt fest eingebrannt eine Querwand und eine Reihe von Diaphragmen, welche den Strahlungsraum vor allzu starker Abkühlung durch die eindringende Luft schützen sollen. Die Querwand hat zwei Löcher, durch welche

die Drähte des Le Chatelierschen Thermoelementes eingeführt werden, dessen Lötstelle E sich im Strahlungsraum nahe der Querwand befindet. Die Diaphragmen a, b, c und d tragen Porzellanröhrchen, und diese enthalten die Drähte des Elements.

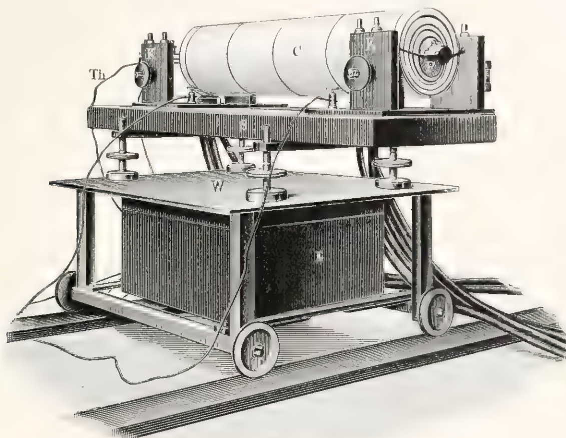


Fig. 5a.

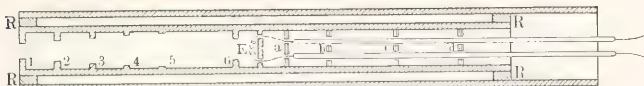


Fig. 5b.

Das Innere des Strahlungsrohres ist mittels einer Mischung aus Chrom-Nickel- und Kobaltoxyd geschwärzt. Diese Schwärzung hält selbst Temperaturen über 1500° C stand.

Die übrigen Ueberstülprohre sollen das Strahlungsrohr vor zu großem Wärmeverlust schützen.

Aus der Gleichheit der Helligkeit im Innern des strahlenden Hohlraums folgt, daß die aus diesem Hohlraum kommende Strahlung tatsächlich die „schwarze" Strahlung von der Temperatur darstellt, welche das Thermoelement anzeigt.

Auch die Versuche mit diesem schwarzen Körper lehrten, daß das Stefan-Boltzmannsche Gesetz bis zu den höchsten Temperaturen (1900° abs.) streng gültig ist, bis zu welchen der elektrisch geglühte Körper geheizt werden konnte, ohne daß das Strahlungsrohr weich wurde und sich durchbog.

Ueber die numerische Bestimmung der Strahlungskonstanten σ in absolutem Maße vgl. den Artikel „Strahlungsmessung".

9. Energieverteilung im Spektrum des schwarzen Körpers. Erst durch die Konstruktion des elektrisch geglühten schwarzen Körpers konnten die schwierigen Messungen im Spektrum der schwarzen Strahlung durchgeführt werden, da diese eine möglichste Konstanz der Temperatur des strahlenden Körpers erheischen. Zur Erzeugung des Spektrums benutzten Lummer-Pringsheim ein Spiegelspektrometer mit vorzüglichem Flußspatprisma. Als Strahlungsempfänger ein Lummer-Kurlbaumsches Linearbolometer, welches wie das Bolometer ebenfalls mit Platinmohr überzogen war.

Um die störenden Absorptionen des Wasserdampfes und der Kohlensäure auf ein Minimum zu reduzieren, war das ganze Spektrobolometer in einen Glaskasten eingebaut, dessen Luft von beiden Gasen möglichst befreit wurde. Die kleinen schraffierten Flächen in den Emissionskurven (Fig. 6) lassen erkennen, inwieweit das Ziel erreicht wurde. In gewöhnlicher Luft reichen diese schraffierten Flächen sehr viel weiter herab. Die im prismatischen Spektrum erhaltenen Emissionskurven sind auf das Normalspektrum reduziert (vgl. den Artikel „Strahlungsmessung"). In Figur 6 ist eine Versuchsreihe in Gestalt von Kurven wiedergegeben, welche direkt erkennen lassen,

wie das Emissionsvermögen des schwarzen Körpers sich mit der Wellenlänge λ und der Temperatur T ändert. In ihr sind als Abszissen die Wellenlängen λ, ausgedrückt in $^1/_{1000}$ mm $= 1\,\mu$, aufgetragen, während die dazu gehörigen Emissionsvermögen S_λ als Ordinaten eingezeichnet sind. Die zu jeder Wellenlänge λ zugehörige Energie erhält man, wenn man das zum Bezirk zwischen λ und $\lambda + d\lambda$ gehörige mittlere Emissionsvermögen S_λ mit $d\lambda$ multipliziert. Die beobachteten Kurven sind also bis auf einen konstanten Faktor identisch mit den Energiekurven und stellen daher auch den Verlauf der Energie von Welle zu Welle richtig dar.

Das sichtbare Spektrum reicht von der Wellenlänge 0,4 μ bis höchstens 0,8 μ, wo in der Figur eine vertikale, gestrichelte Linie eingezeichnet ist. Rechts von diesem vertikalen Strich liegt diejenige Energie, welche wir nicht als Licht empfinden. Die Lichtenergie ist so klein, daß sie trotz der empfindlichsten Strahlungsmesser kaum für die höheren Temperaturen messend verfolgt werden konnte.

Schon der oberflächliche Anblick der Kurvenschar zeigt, daß mit steigender Temperatur die Energie jeder Wellensorte anwächst, daß aber die Energievermehrung um so größer ist, je kleiner die Wellenlänge ist. Aber diese Kurven sagen auch aus, wie sich das Energiemaximum seiner Größe und Lage nach mit wachsender Temperatur verändert. Wir wollen das Resultat vorausnehmen. Bezeichnet man mit λ_m die Wellenlänge, bei der die Energie ihr Maximum besitzt, mit S_m die Größe dieser maximalen Energie und mit T die absolute Temperatur der betreffenden Energiekurve, so gelten die folgenden wichtigen Beziehungen:

$$\lambda_m T = \text{const} = 2940 \quad \ldots \quad (12)$$

und

$$S_m T^{-5} = \text{const.} \quad \ldots \ldots \quad (13)$$

Diese sagen aus:

1. Das Produkt aus der absoluten Temperatur und der Wellenlänge, bei welcher die Energie ihr Maximum hat, ist konstant.

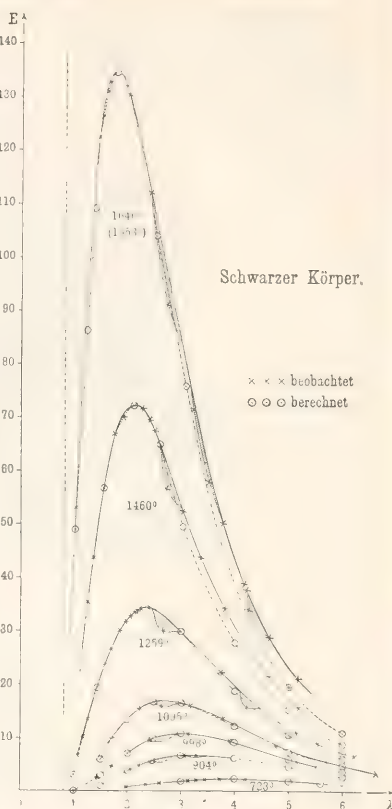


Fig. 6.

2. Die maximale Energie ist proportional der fünften Potenz der absoluten Temperatur.

In der folgenden Tabelle II finden sich

Tabelle II.

T absolut	λ_m	S_m	$\lambda_m T$	$\frac{S_m}{T^5}$	T berechnet	Differenz Grad
1646	1,78	270,6	2928	2246	1653,5	+ 7,5
1460,4	2,04	145,0	2979	2184	1460	— 0,4
1259	2,35	68,8	2959	2176	1257,5	— 1,5
1094,5	2,71	34,0	2966	2164	1092,3	— 2,2
998,5	2,96	21,50	2956	2166	996,5	— 2,0
908,5	3,28	13,66	2980	2208	910,1	+ 1,6
723	4,08	4,28	2950	2166	721,5	— 1,5
621,2	4,53	2,026	2814	2190	621,3	+ 0,1
			Mittel 2940	2188		

die der Kurvenschar entnommenen Daten, welche lehren, wie genau die beiden genannten Gesetze erfüllt sind. Die mit dem Mittelwert des Produktes $\lambda_m T$ **berechneten** Temperaturen der letzten Spalte zeigen auch hier, daß die kleinen Abweichungen recht wohl durch Fehler in der Temperaturmessung zu erklären sind.

Auch diese beiden auf das Energiemaximum bezüglichen Gesetze sind auf theoretischem Wege für die schwarze Strahlung noch vor ihrer experimentellen Verifikation hergeleitet worden. Sie ergeben sich aus dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz in Verbindung mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz ($\lambda_m T = \text{const}$), welches W. Wien unter Anwendung des Dopplerschen Prinzips auf bewegte Spiegel und die an ihnen reflektierten Strahlen rein rechnerisch abzuleiten vermochte (vgl. den Artikel „Strahlung. Thermodynamik der Strahlung"). Schon vor Wien hatten übrigens H. F. Weber und auch Kövesligheti das Verschiebungsgesetz $\lambda_m T = \text{const}$ ausgesprochen. Die überraschende Einfachheit der drei Fundamentalgesetze der schwarzen Strahlung:

$$S = \int_0^\infty S_\lambda d\lambda = \sigma T^4 \quad . \; . \; . \quad (14)$$

$$\lambda_m T = 2940 \quad . \; . \; . \; . \quad (15)$$

$$S_m T^{-5} = \text{const} \quad . \; . \; . \; . \quad (16)$$

gibt der oben erwähnten Prophezeiung Kirchhoffs recht, „daß die Funktion, welche die Energie des schwarzen Körpers in Beziehung zur Wellenlänge und Temperatur setzt, unzweifelhaft von einfacher Form ist, wie alle Funktionen es sind, die nicht von den Eigenschaften einzelner Körper abhängen". Es ist höchst wahrscheinlich, daß diese Gesetzmäßigkeiten für alle Wellen und bis zu den höchsten, denkbaren Temperaturen gelten, also Naturgesetze in des Wortes weitester Bedeutung sind.

10. Spektralgleichung für die Energieverteilung im Spektrum der schwarzen Strahlung. Das durch die Kurvenschar (Fig. 6) wiedergegebene experimentelle Material ist auch geeignet zur Aufstellung einer Spektralgleichung, aus welcher dann rückwärts die Energieverteilung für jede Temperatur und von den kleinsten bis zu den größten Wellen im Normalspektrum der schwarzen Strahlung berechnet werden kann. Eine solche empirische Formel hat natürlich immer das Mißliche, daß man aus dem tatsächlich beobachteten Spektral- und Temperaturbereich auf das nichtbeobachtete Gebiet extrapolieren muß. Es ergab sich daher von selbst, daß das Beobachtungsgebiet soweit als möglich zu erweitern war, um eine möglichst allgemeingültige Spektralgleichung aufstellen zu können. Zu diesem Zwecke benutzten Lummer-Pringsheim auch noch ein Sylvinprisma zur Zerlegung der schwarzen Strahlung in ein Spektrum, da Sylvin größere Wellen (bis 18 μ) hindurchläßt als Flußspat.

Unter Benutzung des sämtlichen Beobachtungsmaterials von Lummer und Pringsheim haben Lummer und Jahnke eine Spektralgleichung abgeleitet, welche nicht nur die auf die Gesamtstrahlung und das Energiemaximum bezüglichen Gesetze enthält, sondern auch das gesamte Beobachtungsmaterial von Lummer und Pringsheim von 1 μ bis 18 μ bis auf etwa 1% genau wiedergibt.

Sie lautet:

$$S_{\lambda T} = C T . \lambda^{-4} \frac{1}{e^{\frac{c}{(\lambda T)^{1,2}}}} \quad . \; . \; . \quad (17)$$

wo C und c zwei Konstanten bedeuten.

Vielleicht noch besser wird das Lummer-Pringsheimsche Beobachtungsmaterial und auch das später gelieferte Material von Rubens-Kurlbaum für die Reststrahlen von Flußspath dargestellt durch die folgende von M. Planck auf theoretischem Wege 1899 hergeleitete Spektralgleichung:

$$S_{\lambda T} = C \lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{c}{\lambda T}} - 1} \quad . \; . \; . \quad (18)$$

Diese Gleichung geht in die von W. Wien 1896 aufgestellte Spektralgleichung über, wenn man im Nenner des Quotienten die „Eins" fortläßt. Die Wiensche Spektralgleichung entbehrt, wie Lummer und Jahnke zeigten, jeder theoretisch genügenden Kraft und gibt die schwarze Strahlung nur für solche Paare von λ und T bis auf 1% genau wieder, für welche das Produkt $\lambda . T < 3000$ ist.

Immerhin heißt das, daß diese Gleichung für die Wellenlängen des sichtbaren Gebietes bis zu Temperaturen über 5000 Grad die Energieverteilung genau darstellt, während sie für lange Wellen schon bei relativ niedrigen Temperaturen große Abweichungen von den Lummer-Pringsheimschen Beobachtungen zeigt. So konstatierten wir schon bei unseren allerersten Versuchen (1899) von 1 μ bis 6 μ systematische Abweichungen von der Wienschen Formel bis zu 20% und bei unseren Versuchen bis 18 μ (1900) Abweichungen bis zu 50%. Damit war die Richtigkeit der Wienschen Spektralgleichung erschüttert, wenn auch die späteren Versuche von Rubens-Kurlbaum mit noch längeren Wellen unter Benutzung der Reststrahlen noch größere Abweichungen zwischen der Beobachtung und der Wienschen Spektralgleichung zeitigten.[1])

[1]) Wenn ich dies ausdrücklich hervorhebe, so geschieht es aus dem Grunde, weil in der

11. Energieverteilung im Spektrum von reinem Platin und anderen edlen Metallen. Während die früheren Beobachter keine einheitlichen Strahlungsgesetze für Platin gefunden hatten, zeigten die Lummer-Pringsheimschen Versuche (1899), daß die Platinemission ganz analoge einfache Gesetze aufweist wie der schwarze Körper:

1. Die Gesamtstrahlung ist proportional der fünften Potenz der absoluten Temperatur.

2. Das Produkt aus maximaler Wellenlänge und absoluter Temperatur ist konstant und hat den Zahlenwert 2630.

3. Die maximale Energie schreitet proportional zur sechsten Potenz der Temperatur fort.

Um die reine Platinstrahlung zu erhalten, sind verschiedene Vorsichtsmaßregeln geboten. Es muß das Platin stets vorher bei der höchsten Temperatur ausgeglüht werden, um es von den oberflächlichen Verunreinigungen zu befreien; ferner muß mit großer Sorgfalt darauf geachtet werden, daß nur Eigenstrahlung des Platins und keine an ihm reflektierte „erborgte" Strahlung zum Bolometer gelangt. Um eine genaue Temperaturmessung zu erzielen, wurde dem strahlenden Platinblech die Form eines vollkommen geschlossenen Hohlraumes gegeben (Fig. 7), in dessen Inneres ein Thermoelement isoliert eingeführt war und dessen äußere, geglättete, ebene Wand strahlte.

In Figur 8 sind die Resultate der blanken Platinstrahlung in derselben Weise aufgetragen, wie zuvor beim schwarzen Körper (Fig. 6), nur ist der Maßstab der Ordinaten hier ein anderer, da die Platinstrahlung sehr viel geringer ist. Die Platinkurven lehren, daß auch beim Platin der Hauptanteil der Energieflächen bis zu den höchsten Temperaturen im Unsichtbaren gelegen ist. Die vertikale Trennungslinie des sichtbaren vom unsichtbaren Wellenlängengebiet bei 0,8 μ ist wieder punktiert gezeichnet.



Fig. 7.



Fig. 8.

Schon Lummer-Jahnke hatten die Beobachtungen am Platin in eine Formel

---

neueren Literatur es anders dargestellt wird. An der Hand der Publikationsdaten laßt es sich leicht feststellen, daß M. Planck seine Abhandlung „Ueber eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung" publizierte, noch ehe Rubens und Kurlbaum ihre Versuche mit den langen Wellen begonnen hatten. Ich wage sogar zu behaupten, daß die Plancksche Theorie, welche zu seiner Spektralgleichung (18) führte und den Anstoß zur Quantentheorie (vgl. den Artikel „Strahlung. Thermodynamik der Strahlung") gegeben und andere wichtige Fortschritte gezeitigt hat, nicht entstanden wäre, wenn Lummer und Pringsheims Versuche die Wiensche Spektralgleichung nicht als ungültig erwiesen hätten, sondern in Uebereinstimmung mit den Paschenschen Versuchen am schwarzen Körper gewesen wären, nach denen die Gültigkeit der Wienschen Gleichung bis auf Bruchteile eines Prozentes von 1 μ bis 8 μ erwiesen war.

gebracht, die ähnlich gebaut ist wie ihre Spektralgleichung für den schwarzen Körper. Später ist es Aschkinass gelungen auf theoretischem Wege nicht nur die Platingesetze herzuleiten, sondern die auf die Gesamtstrahlung und die maximale Strahlung bezüglichen Gesetze des Platins als gültig auch für alle anderen Metalle hinzustellen.

Aschkinass geht aus von der Form des Kirchhoffschen Gesetzes für die undurchlässigen Substanzen (Formel 3 § 3):

$$\left[E_\lambda = \frac{100 - R_\lambda}{100} S_\lambda\right]_T$$

wo das Reflexionsvermögen R_λ in Prozenten zu nehmen ist und folgert, daß wegen der Einfachheit der Platingesetze auch R_λ in einfacher Beziehung zur Wellenlänge λ und zur Temperatur T stehen müsse. Tatsächlich liefert die Maxwellsche Theorie eine solch einfache Beziehung für die Metalle zwischen dem Reflexionsvermögen, der Wellenlänge und der Leitfähigkeit und es ist inzwischen Hagen und Rubens gelungen, den Gültigkeitsbereich dieser Beziehung festzustellen. Beschränkt man sich auf Wellen über 4 μ, so kann man setzen:

$$100 - R_\lambda = 36{,}5 \sqrt{\frac{w}{\lambda}} \quad . \quad . \quad (19)$$

wenn man hier w den spezifischen Widerstand des betreffenden Metalls bei derjenigen Temperatur setzt, bei welcher man R_λ kennen will.

Setzt man diesen Wert in die obige Kirchhoffschen Gleichung ein, so erhält man:

$$\left[E_\lambda = 0{,}365 \sqrt{\frac{w}{\lambda}} S_\lambda\right]_T \quad . \quad . \quad (20)$$

wo für w natürlich der spezifische Widerstand bei T^0 abs. zu setzen und für S_λ die Plancksche Spektralgleichung (18) einzusetzen ist.

Um die Beziehung zwischen λ_{max} und T zu erhalten, braucht man nur $dE/d\lambda = 0$ zu bilden, wobei w und T Konstante sind. Für Platin erhält man dann:

$$\lambda_m T = \frac{c}{5{,}477}$$

wo C die eine Konstante der Planckschen Spektralgleichung ist und nach den Lummer-Pringsheimschen Versuchen den Wert c = 14 600 besitzt. Also wird:

$$\lambda_m T = \frac{14600}{5{,}477} = 2666,$$

während wir für Platin den Wert $\lambda_m T = 2630$ beobachtet haben. Diese gute Uebereinstimmung ist insofern überraschend, als ja bei den Beobachtungen der Wert von λ_{max} zwischen 3,2 μ und 1,4 μ sich verschob, also innerhalb eines Wellenlängengebietes, für welches die Hagen-Rubenssche Beziehung (19) gar nicht gilt.

Aber die Theorie liefert noch mehr. Unter der Annahme, daß für die Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes eines Metalles die einfache Beziehung gilt:

$$w = w_0 \cdot \frac{T}{273}$$

wo w bezw. w_0 den Widerstand bei T^0 abs. bezw. 0^0 C bedeuten, ergeben sich ferner die folgenden Gesetze:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = C.4{,}936.10^{-20} \sqrt{w_0} . T^5$$

$$E_{max} = C . 1{,}334 . 10^{-23} \sqrt{w_0} . T^6$$

$$E_{\lambda T} = C . 0{,}0221 \sqrt{w_0 T} . \lambda^{-5,5} \left(e^{\frac{c}{\lambda T}} - 1\right)^{-1}$$

welche in Uebereinstimmung mit den Platinresultaten von Lummer-Pringsheim aussagen, daß die Gesamtstrahlung eines beliebigen Metalles proportional zur fünften Potenz der absoluten Temperatur nur die maximale Strahlung zur sechsten Potenz der absoluten Temperatur fortschreitet. Aber auch die gemäß der abgeleiteten Spektralgleichung für Platin berechneten Energiekurven stimmen recht befriedigend mit den von uns beobachteten überein.

Es scheint also der Theorie eine weittragendere Bedeutung und ein größerer Gültigkeitsbereich zuzukommen, als man nach den von ihr gemachten Hypothesen erwarten sollte. Das ist insofern wichtig, als es bisher nicht gelungen ist, die Strahlungsgesetze der anderen Metalle, zumal der in den modernen Glühlampen glühenden Metalle zu ermitteln. Auch diese dürften sich in erster Annäherung wie Platin verhalten[1]), wenigstens was die Gesamtstrahlung und die maximale Strahlung anlangt. Selbstredend haben die experimentell gefundenen Platingesetze nur innerhalb des beobachteten Temperatur- und Wellenlängenbereiches strenge Gültigkeit. Ist es doch ausgeschlossen, daß die Gesamtstrahlung von Platin bis zu beliebig hohen Temperaturen proportional zur fünften Potenz fortschreiten kann, da sonst von einer gewissen Temperatur an Platin pro Flächeneinheit mehr strahlen würde als der schwarze Körper. Hieraus erhellt auch, daß den theoretisch abgeleiteten Gesetzen keine allgemeine Gültigkeit zukommen kann.

12. Oekonomie der Lichtquellen. *Ziele der Leuchttechnik.* Aus dem Kirchhoffschen Gesetze folgt, daß der absolut schwarze Körper für jede Wellenlänge mehr strahlt als ein nichtschwarzer Temperaturstrahler

[1]) Hierfür sprechen vom Verfasser angestellte, aber noch nicht publizierte Versuche.

gleicher Temperatur. Hieraus folgt der wichtige Satz: Mit keiner, auf reiner Temperaturstrahlung beruhenden Lichtquelle kann man eine größere Helligkeit erzielen, als mit dem schwarzen Körper gleicher Temperatur. Gleichwohl ist dieser noch sehr unökonomisch, da er bei jeder Temperatur (vgl. die Energiekurven in Fig. 6), den größten Teil der Energie im unsichtbaren Gebiet des Spektrums ausstrahlt und diese für das Auge unnützer Ballast ist.

Da die Energie für die Wellenlänge Null notwendig ebenfalls zu Null herabsinken muß, so zielen alle Energiekurven alle nach dem Nullpunkt des gewählten Koordinatensystems.

Als Maß der gesamten Energie bei einer Temperatur wollen wir diejenige Fläche betrachten, die zwischen der zu dieser Temperatur gehörigen Energiekurve und der Abszissenachse gelegen ist. Demnach wird man als Maß der Lichtoekonomie im physikalischen Sinne das Verhältnis der beiden Teile jeder Fläche betrachten dürfen, in welche diese durch die gestrichelte Vertikallinie bei 0,8 μ zerlegt wird, welche das sichtbare von dem unsichtbaren Gebiet trennt. Denkt man sich die sämtlichen Kurven bis zum Nullpunkt verlängert, so erkennt man, daß die unsichtbare Energiefläche bei Temperaturen der hellen Rotglut, die sichtbare Energiefläche um das 1000fache und bei den höchsten erreichten Temperaturen immer noch um das 100fache überwiegt. Diesen enormen Energieverlust bei Benutzung des schwarzen Körpers als Lichtquelle kann man nur dadurch verkleinern, daß man statt des schwarzen Körpers einen Stoff strahlen läßt, bei dem das Verhältnis der „Lichtfläche" zur „Wärmefläche" günstiger ist, oder anders ausgedrückt, welcher im Vergleich zum Licht weniger Wärme aussendet.

In dieser Beziehung ist schon Platin günstiger als der schwarze Körper gleicher Temperatur. Für Platin und alle Metalle gilt, wie oben erwähnt, die Beziehung:

$$[E_\lambda = (1 - R_\lambda) S_\lambda]_T$$

Da alle Metalle im Unsichtbaren ein größeres Reflexionsvermögen R_λ besitzen als im Sichtbaren, also „selektiv" sind, wie man sagt, so senden sie relativ zum schwarzen Körper mehr Lichtstrahlen als Wärmestrahlen aus und liefern ökonomischere Lichtquellen. Aber auch die Metalle sind, wie die Energiekurven vom Platin (Fig. 8) beweisen, noch weit entfernt von dem Ideal eines Lichtstrahlers. Als solchen wollen wir denjenigen Temperaturstrahler definieren, welcher nur Lichtstrahlen und gar keine Wärmestrahlen aussendet.

Das erste Ziel der Leuchttechnik ist also folgendermaßen zu formulieren: Die leuchtende Substanz soll nur Lichtstrahlen und gar keine Wärmestrahlen aussenden oder in anderen Worten, sie soll alle Lichtstrahlen absorbieren und alle Wärmestrahlen vollkommen spiegeln oder hindurchlassen.

Für eine ideale Leuchtsubstanz muß also im sichtbaren Spektralgebiet $R_\lambda = 0$ und im unsichtbaren Gebiet $R_\lambda = 1$ sein.

Es ist eine noch offene Frage, wodurch die verschiedene Oekonomie der modernen Metallfadenlampen bedingt ist, ob durch die verschiedene selektive Emission oder durch die verschieden hohe Temperatur des Glühfadens. Nach der Aschkinaßschen Theorie ist der Einfluß der selektiven Reflexion bezw. Emission ausgeschlossen. Wohl aber genügt eine geringe Verschiedenheit in der Glühtemperatur, um die Oekonomie um ein Bedeutendes zu verändern. Um dies einzusehen, müssen wir erörtern, wie sich die Lichtstrahlung mit der Tempertaur ändert. Zuvor sei noch auf die Ursache für die Oekonomie des Auerstrumpfes hingewiesen, welcher bestenfalls die Temperatur der Heizflamme annehmen kann. Daß wir es auch bei ihm mit einem Temperaturstrahler zu tun haben, geht aus den Versuchen St. Johns (1895) hervor, welcher fand, daß die Substanz des Auerstrumpfes, im gleichtemperierten Hohlraum erhitzt, sich in bezug auf die Helligkeit von diesem nicht abhebt.

Schon die Messungen von Nernst und Bose zeigten, daß der Auerstrumpf stark selektiv strahlt. Ueber die merkwürdigen Strahlungseigenschaften dieses Leuchtmaterials gaben aber erst die Untersuchungen von Rubens Aufschluß. Seine interessanten Resultate sind in der folgenden Tabelle

λ	Schwarzer Körper bei 1800° abs.	Auerstrumpf	Emissionsvermögen
0,45 μ	4,4	3,8	0,86
0,5	16,1	11,5	0,72
0,55	45,0	22,0	0,49
0,6	100	24,0	0,24
0,7	390	25,8	0,062
1,0	1830	34,3	0,0187
1,2	2030	34,3	0,0116
1,5	3740	34,0	0,0091
2,0	3500	25,5	0,0073
3,0	1910	17,0	0,0088
4,0	962	7,6	0,0079
5,0	511	7,0	0,0137
6,0	202	7,9	0,0270
7,0	178	15,0	0,0843
8,0	113	23,9	0,211

enthalten, in welcher die Emissionsvermögen des Auerstrumpfes mit denen des

gleichtemperierten schwarzen Körpers nebeneinander angegeben sind.

Die Emissionsvermögen sind also im Blau sehr hoch, nehmen nach Rot hin stark ab und wachsen erst wieder jenseits von 6 μ, um bei langen Wellen (in der Tabelle fortgelassen) nahezu den Wert 1 (0,81 bei $\lambda = 18 \mu$) zu erreichen. Die kurzen Wärmewellen, welche bei anderen Lichtquellen überwiegen und einen großen Teil der Strahlungsenergie transportieren, fehlen beim Auerbrenner fast vollkommen.

Zweites Ziel der Leuchttechnik (Beziehung zwischen der Helligkeit und der Temperatur). Im Vorigen haben wir dargelegt, daß wir noch weit von dem hohen Ziele entfernt sind: Licht ohne Wärme zu erzeugen. Erst wenn der „ideale" Leuchtkörper aufgedeckt sein wird, kann die mit der Oellampe der Alten begonnene Trennung von Licht und Wärme als vollzogen betrachtet werden. Bei dem Streben nach der Verwirklichung dieses ersten Zieles der Leuchttechnik muß man aber noch ein zweites Ziel im Auge behalten, dessen Bedeutung man erkennt, wenn man die Abhängigkeit der Helligkeit von der Temperatur diskutiert.

a) Fortschreiten der Helligkeit einer einzelnen Farbe mit der Temperatur: Um zu erfahren, wie die als Licht empfundene Energie oder die Helligkeit von der Temperatur abhängt, mißt man mittels des Spektralphotometers die Helligkeit für einige Temperaturen des Strahlungskörpers und konstruiert sich eine Kurve. Diese „isochromatischen" Kurven nehmen eine besonders einfache Form an, wenn man nach Wanner als Abszissen die reziproken Werte der absoluten Temperatur (1/T) und als Ordinaten die Logarithmen der als Licht empfundenen Energie (log E) aufträgt. In Fig. 9 sind die Isochromaten des schwarzen Körpers wiedergegeben, welche Lummer und Pringsheim mit Hilfe eines Lummer-Brodhunschen Spektralphotometers gewonnen haben.

Man erkennt zunächst, daß die schwarzen logarithmischen Isochromaten gerade Linien sind, die man ohne Fehler bis zu Temperaturen von 5000 Grad extrapolieren darf, da erst dann $\lambda T > 3000$ wird (vgl. § 10). Aus ihrer steilen Richtung folgt, daß sich die Helligkeit mit der Temperatur enorm schnell ändert. Gemäß der „Isochromate" für die Wellenlänge 0,589 μ des Natriumlichtes z. B. verdoppelt sich die Helligkeit, wenn sich die Temperatur des schwarzen Körpers nur von 1800° auf 1875° abs., d. h. um nur 4% erhöht. Noch schneller wächst die Helligkeit im blauen Teile des Spektrums.

b) Spektralphotometrische Temperaturbestimmung. Diese isochromatischen Geraden bilden die Grundlage für eine sehr genaue spektralphotometrische Temperaturbestimmung eines beliebig hoch temperierten schwarzen Körpers zu finden, dessen Temperatur durch ein Thermoelement nicht mehr direkt gemessen werden kann. Bei ihr braucht man nur die Helligkeit des zu untersuchenden schwarzen Körpers für eine der in Figur 9 aufgeführten Wellen zu bestimmen, den Logarithmus dieser Energie als Ordinate in die zur Welle gehörige „Isochromate" einzupassen, um aus der zugehörigen Abszisse seine Temperatur zu finden. Ist der zu untersuchende Strahlungskörper nicht schwarz, so erhält man auf diese Weise nicht seine wahre Temperatur, sondern seine sogenannte „schwarze Temperatur", d. h. diejenige Temperatur, welche dem Körper zukäme, wenn er wie ein absolut schwarzer Körper strahlte. Diese rein spektralphotometrische Methode der Temperaturbestimmung zeichnet sich dadurch noch besonders aus, daß sie auch für Strahlungskörper, welche, wie das blanke Platin, bedeutend vom schwarzen Körper abweichen, nahe richtige Werte liefert. Nach Versuchen von Lummer-Pringsheim betragen die

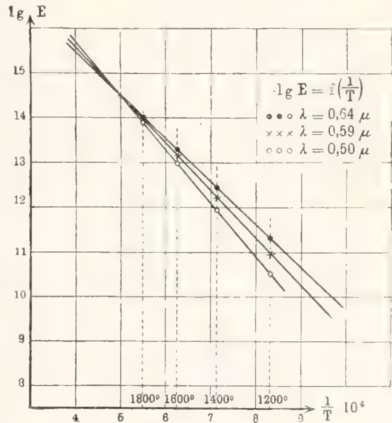


Fig. 9.

Differenzen beim blanken Platin zwischen der direkt gemessenen wahren und der schwarzen Temperatur bei 1100° abs. etwa 40°, bei 1880° abs. etwas über 100°. Der Grund hierfür ist in dem enorm schnellen Anwachsen der Helligkeit einer Farbe mit der Temperatur zu suchen. Hieraus folgt auch noch weiter, daß die Genauigkeit der photometrischen Einstellung eine sehr nebensächliche Rolle

spielt. Ein Einstellungsfehler von 10% bewirkt in der Temperaturbestimmung erst einen Fehler von etwa 10° bei der Temperatur weißglühenden Platins. Diese Methode bildet daher die Grundlage für die neueren „optischen Pyrometer", welche mittels einer einzigen photometrischen Einstellung die „schwarze" Temperatur einer Flamme, eines Hochofens usw. bis auf etwa 100° genau zu messen und bis auf wenige Grade zu reproduzieren erlauben (vgl. den Artikel „Strahlungsmessung").

c) Abhängigkeit der Gesamthelligkeit von der Temperatur. Außer diesen Messungen im Spektrum liegen noch photometrische Beobachtungen von Lummer-Kurlbaum vor, bei denen das Fortschreiten der gesamten, als Licht empfundenen Energie bestimmt wurde. Diese lehren, daß die gesamte Helligkeit beim Platin und beim schwarzen Körper noch weit schneller anwächst mit der Temperatur als das Energiemaximum. Für Platin erhielten Kurlbaum und der Verfasser folgendes Resultat:

Es schreitet die Gesamthelligkeit in der Nähe der Rotglut proportional zur 30. Potenz und bei hoher Weißglut immer noch zur 12. Potenz der absoluten Temperatur fort.

Ein ähnlich schnelles Anwachsen der Helligkeit ergibt sich auch aus Versuchen, welche Pringsheim und der Verfasser angestellt haben, um die Gesamtlichtstärke des schwarzen Körpers in Hefnerkerzen auszudrücken. Nach diesen Versuchen strahlt 1 qmm des schwarzen Körpers:

bei 1500° C etwa 0,1 HK
„ 1700° C „ 0,5 „
„ 1800° C „ 1,0 „

Lassen wir das beim Platin gefundene Gesetz auch für die anderen nichtschwarzen Strahlungskörper gelten, so folgt also: Erhöhen wir die Temperatur eines Leuchtkörpers von 2000° auf 4000° oder von 1 auf 2, so steigt seine Helligkeit von 1 auf 2^{12}, d. h. von 1 auf 4000. Da die Kohle in der Bogenlampe bei 4000°, die Kohle in der Glühlampe etwa bei 2000° glüht, so sendet also die Bogenlampe pro Flächeneinheit rund 4000mal mehr Licht aus als die Glühlampe. Die Sonne, welche bei rund 6000° glüht, übertrifft die Glühlampe an Helligkeit pro Flächeneinheit also sogar um das 3^{12}-fache, d. h. um das 600000fache.

Eine bis zum Zerspratzen (bei 3000° abs.) erhitzte 16kerzige Glühlampe liefert über 2000 Kerzen, von denen jede pro Stunde nur 0,007 Pfennige kostet: Sie liefert also von allen existierenden Lichtquellen das billigste Licht; freilich ist ihre Lebensdauer eine außerordentlich kurze.

Aus alledem geht also deutlich hervor, daß trotz gleich angenommener Strahlungseigenschaften der Metalle Tantal, Wolfram und Osmium (ähnlich denen des blanken Platins) ihre verschiedene Oekonomie bezw. ihr verschieden großer Wattverbrauch pro Kerze leicht und zwanglos durch eine verschieden hohe Temperatur ihrer Glühfäden erklärbar ist. Erst wenn man ihre wahren Temperaturen zu bestimmen imstande sein wird, kann diese Frage aber eindeutig beantwortet werden.[1])

Um die vorhandenen Lichtquellen nach ihrem physikalischen Wert zu ordnen, müssen wir also ihre Temperatur und ihre Energiekurve kennen. Bei den frei brennenden Flammen, bei denen Kohlenstoff im feinstverteilten Zustande glüht, bei den verschiedenen Glühlampen, inkl. Nernstlampe und Auerstrumpf, beim Zirkonlicht und Drumondschen Kalklicht und beim elektrischen Bogenlicht, ist man noch weit vom „idealen" Temperaturstrahler entfernt. Hier trägt den Sieg davon und liefert das billigste Licht, wer es vermag, die Leuchtsubstanz auf die höchste Temperatur zu erhitzen. Nur bei der Quecksilberlampe und den „farbigen" Bogenlampen, bei denen Dämpfe infolge Elektrolumineszenz leuchten, spielt die Temperatur eine nebensächliche Rolle.

13. Die strahlungstheoretische Temperaturskala. Bisher beruhte die wissenschaftliche Temperaturmessung auf der Ausdehnung der Gase. Die Anwendung des Gasthermometers ist aber nur bis zu Temperaturen von 1150° C möglich. Andere thermometrische Methoden, z. B. die thermoelektrische, sind andererseits nur durch Extrapolation einer empirischen Formel an die gasthermometrische Skala angeschlossen.

Durch die Verwirklichung der schwarzen Strahlung und die experimentelle Festlegung ihrer Gesetze ist ein neuer Weg zur Erreichung einer neuen auf die gasthermometrische Skala bezogenen, auch bei hohen Temperaturen brauchbare Temperaturskala eröffnet.

Setzt man voraus, daß die Gesetze der schwarzen Strahlung wahre Naturgesetze vorstellen und somit für alle Temperaturen gültig sind, dann muß sich für die Temperatur eines schwarzen Körpers nach allen den verschiedenen Methoden der gleiche Wert ergeben, wie hoch diese Temperatur auch sein mag.

Um dies zu prüfen und die Temperaturskala bis zu möglichst hoher Temperatur zu verwirklichen, konstruierten Lummer-

[1]) Zusatz bei der Korrektur. Dem Verf. ist es inzwischen gelungen aus den elektrischen Größen (Watt) die wahre Temperatur zu berechnen.

Pringsheim den in Figur 10 abgebildeten „absolut schwarzen Kohlekörper".

Der strahlende Hohlraum wird dargestellt durch ein vom elektrischen Strom durchflossenes Kohlerohr R von 1,2 mm Wandstärke, 34 cm Länge und 1 cm innerem Durchmesser. Diese von der Firma Gebr. Siemens u. Co. in Charlottenburg besonders angefertigten Rohre zeichnen sich durch ihre genaue zylindrische Form und gleichmäßige Wandstärke aus. Die Enden des Kohlenrohres sind schwach konisch ausgebildet und galvanoplastisch verkupfert. Ueber diese konischen Enden sind dickere, 7 cm lange Kohlezylinder A mit entsprechender Bohrung übergestülpt, welche innen und außen verkupfert sind. Diese Ansatzstücke ruhen in starken metallischen Klemmbacken B, welche die Stromzuführung vermitteln. Die vordere Klemme B ist auf der Schieferplatte S des Stativs fest montiert, die hintere ruht mit einer Gleitfläche auf dem Metallklotz E lose auf, so daß das Rohr der Ausdehnung durch die Wärme frei folgen kann. Die Hinterwand des strahlenden Hohlraumes wird durch einen Kohlepfropf P_1 gebildet,

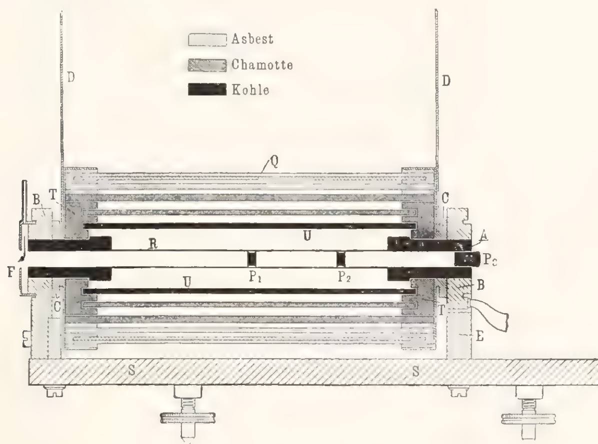


Fig. 10.

der in der Mitte des Kohlerohres sitzt und dieses möglichst luftdicht abschließt. Hinter P_1 sitzt ein eben solcher zweiter Pfropf P_2, welcher die noch vorhandenen Lücken zwischen dem ersten Pfropfen und der Rohrwand möglichst unschädlich macht. An der Rückseite ist das Rohr durch einen dritten Pfropfen P_3 hermetisch verschlossen, um den Zutritt des Sauerstoffs der äußeren Luft abzuschneiden.

Um die Kohle außen vor der Verbrennung zu schützen, ist das Heizrohr mit einem System von Hüllen umgeben, deren Montierung aus der Figur ersichtlich ist. Um die allzu starke Erhitzung der Klemmbacken zu verhindern, sind große Kupferscheiben D angebracht, die fest auf den Kupferringen C aufsitzen und die Wärme nach außen ableiten.

Bei Anwendung eines Stromes von 160 Amp. wurde eine Temperatur von 2300° abs. erreicht, auf welcher sich der Körper einige Stunden ziemlich konstant erhalten ließ.

Diese Temperatur wurde auf indirektem Wege durch die verschiedensten Methoden erschlossen und zwar unter Voraussetzung, daß die Strahlungsgesetze des schwarzen Körpers bis zu beliebig hohen Temperaturen gelten. Hat man mit Hilfe des elektrisch geglühten Körpers von Lummer-Kurlbaum (Fig. 5 S. 779) von bekannter, zu messender Temperatur das Flächenbolometer und das Spektralphotometer „geeicht", so ergibt eine Messung der Gesamtstrahlung und der photometrischen Helligkeit unter Zugrundelegung der schwarzen Isochromaten die unbekannte Temperatur des Kohlekörpers. Mit Hilfe des geeichten Spektrobolometers andererseits erhält man aus der maximalen Strahlung und der Beziehung $S_m . T^{-5} =$ const (S. 781) ebenfalls die Temperatur des Kohlekörpers.

In der Tabelle auf S. 788 sind die Resultate einer Beobachtungsreihe in zeitlicher Aufeinanderfolge mitgeteilt.

Reihenfolge	Methode	Abs. Temp.	90 cm	60 cm	0,62 μ	0,59 μ	0,55 μ	0,51 μ	0,49 μ
1.	Helligkeit . . .	2310	—	—	2294	2315	2309	2312	2320
2.	Gesamtstrahlung	2325	2317	2335	—	—	—	—	—
3.	Helligkeit. . . .	2320	—	—	2307	2307	2315	2331	2339
4.	Gesamtstrahlung	2330	2330	2330	—	—	—	—	—
5.	Energiemaximum	2330	—	—	—	—	—	—	—
6.	Helligkeit . . .	2330	—	—	2325	2327	2325	2339	2333
7.	Gesamtstrahlung	2345	2348	2339	—	—	—	—	—
8.	Energiemaximum	2320	—	—	—	—	—	—	—

Die spektralphotometrisch gewonnenen Temperaturen sind in den Zeilen 1, 3 und 6 enthalten, wobei der unter „Temperatur" angegebene Wert der Mittelwert aus den für die verschiedenen Wellenlängen gefundenen und in der Tabelle aufgeführten Zahlen ist. Die Zeilen 2, 4 und 7 enthalten die mit dem Flächenbolometer unter Zugrundelegung des Stefanschen Gesetzes für die Gesamtstrahlung gewonnenen Temperaturen als Mittel der für zwei Entfernungen 90 cm und 60 cm gesondert angegebenen Zahlen. Die Zeilen 5 und 8 geben die aus der Intensität des Energiemaximums unter Benutzung der Beziehung $S_m T^{-5} = \text{const}$ erhaltenen Temperaturen wieder.

Die Uebereinstimmung der nach den verschiedenen Methoden gefundenen Temperaturen ist so gut, daß damit die Gültigkeit der zugrunde gelegten Strahlungsgesetze bis 2300° abs. so gut wie erwiesen und die Grenze der exakten Temperaturmessung um fast 1000° erweitert worden ist.

Geht man aber weiter und definiert die absolute Temperatur direkt durch die schwarze Strahlung, etwa indem man die Temperatur als eine bestimmte Funktion der Gesamtstrahlung definiert, so gewinnt man eine neue, absolute, strahlungstheoretische Temperaturskala. Wählt man als diese Funktion die vierte Wurzel aus der Gesamtstrahlung und nimmt man ferner die konventionelle Festsetzung hinzu, daß die Temperaturdifferenz zwischen dem Siedepunkt und dem Gefrierpunkt des Wassers 100° beträgt, so stimmen die Angaben der neuen Skala auch mit denen der gasthermometrischen Skala überein.

Literatur. *Zusammenhängende Darstellungen und Originalwerke.* **Lambert,** *Photometria sive de mensura et gradibus luminis etc. 1760, übers. v. E. Anding. Leipzig 1892.* — **O. Lummer,** *Le rayonnement des corps noirs Rapport presenté au Congrès intern. de physique. Tome II, p. 41 bis 99. Paris 1900.* — **Derselbe,** *Ziele der Leuchttechnik. München und Berlin 1901.* — *Müller-Pouillets, Lehrbuch d. Phys. 10. Aufl., II. Bd., III. Buch. Die Lehre von der strahlenden Energie von* **Otto Lummer.** *Braunschweig 1909. Diesem Buche sind die meisten Figuren und manche Stellen wörtlich entnommen.* — **M. Planck,** *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung. II. Aufl. Leipzig 1913.* — **Le Chatelier et Bondonard,** *Températures élevées. Paris 1900.*

Abhandlungen. **G. Kirchhoff,** *Berl. Ber. 1859, S. 216 u. Pogg. Ann.* **109**, *275 bis 301, 1860.* — **Stefan,** *Wien. Akad. Ber. (2)* **79**, *391 bis 428, 1879.* — **Bartoli,** *Le Monnier 1876. Siehe auch Galitzine Wied. Ann.* **3**, *479, 1892.* — **Boltzmann,** *Wied. Ann.* **5**, *292, 1894.* — **Kundt und Warburg,** *Pogg. Ann.* **155**, *337 und 525;* **156**, *177, 1875.* — **F. Paschen,** *Wied. Ann.* **49**, *50 bis 68, 1893;* **58**, *455 bis 492, 1896;* **60**, *662 bis 723, 1897; Berl. Ber. (2)* **108**, *959, 1899 bis 1900.* — **H. Wanner,** *Ann. d. Phys.* **2**, *141 bis 157, 1900; Phys. Zeitschr.* **3**, *105 bis 128, 1901.* — **F. Paschen und H. Wanner,** *Berl. Ber.* **108**, *5, 1899.* — **L. Holborn und F. Kurlbaum,** *Berl. Ber.* **1901**, *712 bis 719.* — **W. Wien,** *Berl. Ber.* **1893**, *55 bis 62; Wied. Ann.* **52**, *132 bis 165, 1894.* — **W. Wien und O. Lummer,** *Wied. Ann,* **56**, *451 bis 456, 1895.* — **E. St. John,** *Wied. Ann.* **56**, *433 bis 450, 1895.* — **O. Lummer und E. Pringsheim,** *Verh. d. Deutsch. Phys. Ges.* **1**, *23 bis 41 und 215 bis 235, 1899;* **2**, *163 bis 180, 1900;* **3**, *36 bis 46, 1901;* **5**, *1 bis 13, 1903; Phys. Zeitschr.* **7**, *89 bis 92, 1906 und* **7**, *189 bis 190, 1906.* — **E. Warburg,** *Verh. d. Deutschen Phys. Ges.* **1**, *50 bis 52, 1899.* — **O. Lummer und F. Kurlbaum,** *Wied. Ann.* **66**, *204 bis 224, 1892; Berl. Ber.* **11**, *1894; Verh. d. Phys. Ges.* **17**, *Nr. 9, 1898.* — **O. Lummer und E. Jahnke,** *Ann. d. Phys. (4)* **3**, *283 bis 297, 1900.* — **E. Jahnke, O. Lummer und E. Pringsheim,** *Ann. d. Phys.* **4**, *225, 1901.* — **H. Rubens und F. Kurlbaum,** *Berl. Ber.* **1900**, *929 bis 941; Ann. d. Phys.* **4**, *649 bis 666, 1901.* — **E. Hagen und H. Rubens,** *Verh. d. Deutsch. Phys. Ges.* **5**, *113 und 145, 1903; Berl. Ber.* **1903**, *269 und 410; Ann. d. Phys.* **11**, *873, 1903.* — **Aschkinass,** *Ann. d. Phys.* **17**, *960, 1905.* — **Gibson,** *Inaug.-Dissert. Breslau 1911. Physikal. Zeitschr. 15. Dez. 1911.* — **Holborn und Day,** *Ann. d. Phys.* **2**, *505 bis 545, 1900.* — **Nernst und Bose,** *Phys. Zeitschr.* **1**, *289 bis 291, 1900.* — **H. Rubens,** *Ann. d. Phys.* **18**, *725 bis 738, 1905 und* **20**, *593 bis 600, 1906.*

O. Lummer.

Strahlung.

Thermodynamik der Strahlung.

1. Inhalt dieses Artikels. 2. Die Entropie der Strahlung. 3. Das Strahlenbündel. 4. Energie und Entropie des Strahlenbündels. 5. Die Umkehrbarkeit der Spiegelung und Brechung. 6. Das Strahlungsgleichgewicht in einem Hohlraum (Kirchhoffsches Gesetz). 7. Das Wiensche Verschiebungsgesetz und das Stephan-Boltzmannsche Gesetz. 8. Das Plancksche Strahlungsgesetz. 9. Die ponderomotorischen Wirkungen der Strahlung; Theorie der Kometenschweife.

1. **Inhalt dieses Artikels.** Während in dem vorhergehenden Artikel die Strahlungstheorie im Anschluß an die historische Entwickelung dargestellt ist, soll im folgenden eine Art Querschnitt durch sie hergestellt werden, wodurch besonders die thermodynamischen Bestandteile in ihrem Aufbau hervorgehoben werden. Den Ausgangspunkt soll der Begriff der Entropie der Strahlung bilden. Wir denken uns dazu einen beliebigen Strahlungsvorgang in Strahlenbündel zerlegt und machen einen zwar plausiblen, in Strenge aber nur durch die Konsequenzen zu rechtfertigenden Ansatz für die Entropie des Strahlenbündels. Das Kirchhoffsche Gesetz ergibt sich dann aus der Forderung, daß die Hohlraumstrahlung ein thermischer Gleichgewichtszustand sein soll, das Wiensche Verschiebungsgesetz nebst dem Stephan Boltzmannschen Gesetz durch Betrachtung der umkehrbaren Spiegelung eines Strahls an einem bewegten Körper, einfacher noch im Sinne der Relativitätstheorie durch Betrachtung desselben Strahlenbündels von zwei verschiedenen berechtigten Bezugssystemen aus. Das Plancksche Strahlungsgesetz freilich läßt sich hier ebensowenig wie sonst rein thermodynamisch ableiten; hier müssen wir uns notgedrungen auf das statistische Gebiet begeben, obwohl auf diesem eine völlig befriedigende Theorie noch nicht vorliegt.

2. **Die Entropie der Strahlung.** Der zweite Hauptsatz bezieht sich in seiner ursprünglichen, von Clausius herrührenden Fassung allein auf Körper; er behauptet, daß bei keinem Vorgang die Entropie aller an ihm beteiligten Körper abnimmt. Die Entropie S ist dabei für einen homogenen Körper durch die Differentialgleichung $dS = \frac{dU + pdV}{T}$ definiert; die Energie U und das Volumen V des Körpers sind dabei als die unabhängigen Zustandsvariablen gedacht, der Druck p und die Temperatur T als Funktionen von ihnen. Die Entropie eines Konglomerates von mehreren Körpern wird als Summe der Entropien der Teile berechnet.

Nun denken wir uns einen Körper, welcher allein auf Kosten seiner Wärmeenergie unter Abkühlung strahlt. Bei diesem Vorgang ist dU negativ und pdV meist auch negativ, immer aber so klein, daß das Vorzeichen von dS auch das negative ist. Die Entropie des Körpers nimmt also ab. Andere Körper sind an dem Vorgang erst beteiligt, wenn die entsandte Strahlung auf sie trifft. Wann und ob dies überhaupt geschieht, hängt von den besonderen Umständen ab. Der zweite Hauptsatz wäre also verletzt, wenn man nicht auch der Strahlung Entropie zuschriebe. Er ist dann so auszusprechen, daß die gesamte Entropie aller beteiligten Körper und der Strahlung nie abnimmt.

Im Hinblick auf diese zwingende Notwendigkeit den Begriff der Entropien auf die Strahlung zu übertragen, kann es merkwürdig erscheinen, daß dieser Schritt erst ziemlich spät getan ist. Bei Kirchhoff, der zuerst sah, daß man aus dem zweiten Hauptsatz Schlüsse auf die Thermodynamik ziehen kann, fehlt der Begriff der Strahlungsentropie noch vollständig; es handelt sich bei ihm stets um die Frage: Wie muß die Strahlung beschaffen sein, damit sie ein Wärmegleichgewicht zwischen Körpern nicht stört? Stillschweigend wird dieser Begriff zwar von Boltzmann bei seiner Begründung des Stephan-Boltzmannschen Gesetzes benutzt; denn gewisse thermodynamische Funktionen, welche sich nur mit Hilfe der Entropie definieren lassen, werden dabei auf die Hohlraumstrahlung selbst angewandt. Ausgesprochen findet er sich aber erst bei W. Wien; eine seiner Abhandlungen, in welcher das Wiensche Verschiebungsgesetz abgeleitet wird, führt den Titel: Temperatur und Entropie der Strahlung.

3. **Das Strahlenbündel.** Wollen wir die Entropie der Strahlung berechnen, so müssen wir den gesamten, im allgemeinen recht verwickelten Strahlungsvorgang in seine einfachsten Elemente zerlegen. Es empfiehlt sich dabei die Zerlegung in Strahlenbündel. Wir verstehen unter einem Strahlenbündel die (vierfach unendlich) Gesamtheit von Strahlen, welche von einer Fläche $d\sigma$ ausgehen und alle Richtungen eines gewissen körperlichen Winkels $d\Omega$ erfüllen. Die Normale von $d\sigma$ mag mit einer der Richtungen dieses körperlichen Winkels den Winkel ϑ (zwischen 0 und $\frac{\pi}{2}$) bilden. Es gibt nun noch zwei senkrecht zueinander polarisierte Schwingungsvorgänge, welche in diesen geometrischen Bestimmungsstücken übereinstimmen. Wir setzen stets, wenn wir von einem Strahlenbündel reden, lineare Polarisation voraus. In der Anwendung der Differentialzeichen $d\sigma$ und $d\Omega$ liegt schon, daß wir uns beide Größen so klein denken, daß der Strahlungszustand in ihnen nicht merklich variiert. Doch dürfen wir keineswegs im mathematischen Sinne den Grenzübergang zu immer kleineren Werten machen, das brächte uns in Gegensatz zur Wellentheorie des Lichtes. Die geometrische Optik, welche wir hier benutzen, gilt ja nur, wenn die Wellenlänge des Lichtes klein ist gegen alle sonst in Betracht kommenden Strecken. Aus diesem Grunde muß $d\sigma$ in seinen Abmessungen immer noch groß sein gegen die Wellenlänge. Diese Beschränkung fällt deswegen nicht so sehr ins Gewicht, weil bei allen Schwingungen, deren Ursprung in den Molekülen liegt, die so definierten Strahlenbündel die einfachsten beobachtbaren Elementarvorgänge sind. Gewiß spricht die Optik meist von einzelnen Wellen, welche einen schwingenden Dipol als Ursprung haben. Die Energie einer solchen Welle wäre aber unbeobachtbar klein; erst die Gesamtheit von Wellen, welche ein Strahlenbündel bildet, führt merkliche Energiemengen mit sich. Es sei darauf hingewiesen, daß die Fläche $d\sigma$ beliebig im Raume gewählt ist. Sie ist nicht etwa Strahlungsquelle; Flächen

können diese Rolle überhaupt nicht spielen. Immer sind räumliche Bereiche zur Entsendung endlicher Energiemengen notwendig. Freilich beschränken sie sich bei stark absorbierenden Körpern auf dünne Schichten an der Oberfläche; ihre Dicke, welche ungefähr der Dicke einer noch gerade durchsichtigen Schicht des gleichen Materiales entspricht, ist aber niemals Null.

Im allgemeinen enthält ein Strahlenbündel nun noch Schwingungen der verschiedensten Schwingungszahlen. Um zu einem elementaren Vorgang zu gelangen, muß man noch die Beschränkung auf alle Schwingungen eines kleinen Intervalles $d\nu$ hinzufügen. So gelangt man zu einem monochromatischen oder spektral homogenen Strahlenbündel von der Schwingungszahl ν. Auch der Bereich $d\nu$ darf indessen nicht zu klein gewählt werden, da sonst die ihm entsprechende Energie unbeobachtbar klein würde.

Wir können es leicht so einrichten, daß ein Körper nur ein Strahlenbündel emittiert. Denken wir ihn von einer vollkommen spiegelnden, also für Strahlung undurchdringlichen Hülle umgeben bis auf ein Stück $d\sigma$ seiner Oberfläche, legen wir dann um dies Stück als Mittelpunkt eine Kugel aus vollkommen spiegelndem Material, deren Radius R gegen alle Abmessungen von $d\sigma$ sehr groß ist, so wird alle von $d\sigma$ ausgehende Strahlung wieder nach $d\sigma$ zurückgeworfen. Schneiden wir aber aus der Kugel ein gegen $d\sigma$ großes Stück $d\sigma'$ aus, so gelangt das Strahlenbündel ins Freie, welches von $d\sigma$ in den Winkel

$$d\Omega = \frac{d\sigma'}{R^2}$$

entsandt wird. Man kann auch hier die Beschränkung auf den Spektralbereich $d\nu$ und eine Polarisationsrichtung vornehmen, wenn man das Stück $d\sigma'$ der Kugelfläche aus einer Substanz herstellt, welche nur Strahlung dieses Bereiches und einer bestimmten Schwingungsrichtung hindurch läßt, alle anderen vollständig spiegelt. Da die Aussendung dieses Bündels die Entropie des Körpers vermindert, muß auch ein einzelnes polarisiertes, monochromatisches Strahlenbündel Entropie besitzen.

4. Energie und Entropie des Strahlenbündels. Die Energie J, welche das Strahlenbündel in der Zeiteinheit fortführt, ist einmal proportional zu seinem senkrechten Querschnitt $d\sigma \cos\vartheta$, sodann zu den Bereichen $d\Omega$ und $d\nu$. Man bezeichnet sie als Intensität und den Proportionalitätsfaktor $\mathfrak{K}_\nu$ in der Gleichung

$$J = \mathfrak{K}_\nu \, d\sigma \cos\vartheta \, d\Omega \, d\nu$$

als die spezifische Intensität des monochromatischen, polarisierten Strahlenbündels. $\mathfrak{K}_\nu$ ist nicht mehr abhängig von $d\sigma$, $d\Omega$, $d\nu$. Durch die Größe der Bereiche $d\sigma$, $d\Omega$, $d\nu$, den Richtungswinkel ϑ, die Polarisationsrichtung und durch die spezifische Intensität $\mathfrak{K}_\nu$ sowie durch die Schwingungszahl ν ist uns ein Strahlenbündel im leeren Raume vollständig bestimmt. Liegt es in einem anderen duchrsichtigen Körper, so muß die Angabe seines Brechungsindex n hinzu kommen. Die genannte Energie befindet sich in einem Abschnitt von der Länge c im Strahlenbündel. Auf die Länge 1 entfällt somit die Energie

$$U = \frac{1}{c} \mathfrak{K}_\nu \, d\sigma \cos\vartheta \, d\Omega \, d\nu \quad . \; . \; . \quad 1)$$

Auf ganz ähnliche Art läßt sich auch die Entropie eines Strahlenbündels berechnen. Entsendet nämlich die Fläche $d\sigma$ in der in Nr. 3 beschriebenen Art zwei Strahlenbündel von den Oeffnungswinkeln $d\Omega_1$ und $d\Omega_2$, oder gehen von zwei verschiedenen Flächenstücken $d\sigma_1$ und $d\sigma_2$ zwei in der Richtung und im Oeffnungswinkel $d\Omega$ übereinstimmende Strahlenbündel aus, so wird man deren Entropien addieren, um die gesamte Entropie der beiden zu finden — wie man auch in einem materiellen System die Entropie als Summe aus den Entropien der Teile berechnet. Desgleichen wird man die Entropien zweier räumlich zusammenfallenden, aber in der Schwingungszahl ν verschiedenen Strahlenbündel addieren. Dies führt dann dazu, die Entropie eines Strahlenbündels proportional zu setzen zu seinem Querschnitt $d\sigma \cos\vartheta$, zu seinem Oeffnungswinkel $d\Omega$ und seinem Spektralbereich $d\nu$. Man findet also in Analogie zu 1)

$$S = \frac{1}{c} \mathfrak{L}_\nu \, d\sigma \cos\vartheta \, d\lambda \, d\nu \quad . \; . \; . \quad 2)$$

den Proportionalitätsfaktor $\mathfrak{L}_\nu$ bezeichnet man als die spezifische Entropiestrahlung. Diese hängt nicht mehr ab von den Bereichen $d\sigma \cos\vartheta$, $d\Omega$, $d\nu$, sondern (für den leeren Raum) nur noch von den beiden anderen Bestimmungsstücken eines Strahlenbündels, der spezifischen Intensität und der Schwingungszahl ν. Das wichtigste Problem der Strahlungstheorie besteht darin, $\mathfrak{L}_\nu$ als Funktion von $\mathfrak{K}_\nu$ und ν zu bestimmen.

Ein Strahlenbündel von der betrachteten Art schreite im Raume fort. Wir wollen es durch vollkommen reflektierende Spiegel (Konvex- oder Konkavspiegel) in ein anderes verwandeln, welches die Fläche $d\sigma_1$ als Brennfläche hat, mit ihrer Normalen den Winkel Ω_1 bildet und in dem räumlichen Winkel $d\Omega_1$ liegt. In der Länge, der Schwingungszahl, deren Spektralbereich und der Energie stimmt dies mit dem früheren überein; desgleichen ist nach dem Sinussatz der geometrischen Optik, da $d\sigma_2$ das optische Bild von $d\sigma$ ist:

$$d\sigma_1 \cos\vartheta_1 d\lambda_1 = d\sigma \cos\vartheta d\lambda$$

Deswegen ist nach 1 auch die spezifische Energie K_ν und, da diese zusammen mit der Schwingungszahl ν die spezifische Entropiestrahlung L_ν bestimmt, auch diese die alte geblieben. Nach 2 stimmen somit beide Strahlenbündel mit der Entropie überein. Wir erkennen daran einmal, daß die freie Fortpflanzung und die vollkommene Spiegelung die spezifische Intensität nicht verändern, sodann, daß sie umkehrbare Vorgänge sind. Das letztere ist ja auch deswegen einleuchtend, weil man das zuletzt betrachtete Strahlenbündel durch geeignete vollkommene Spiegelung in das erstere vollständig wieder zurückverwandeln kann.

Sodann lassen wir das Strahlenbündel aus dem leeren Raume in ein anderes durchsichtiges Mittel eintreten. Reflexionsverluste vermeiden wir, indem wir als Einfallswinkel den Polarisationswinkel wählen und die Polarisationsebene des Strahlenbündels senkrecht zur Einfallsebene stellen. Auf diese Weise bekommen wir in dem zweiten Mittel, das den Brechungsindex n haben möge, ein Strahlenbündel, für welches wir

(wiederum mit Hilfe vollkommener Spiegel) eine Fläche $d\sigma_2$ zur Brennfläche machen können, während die übrigen geometrischen Bestimmungsstücke die Werte ϑ_2, $d\Omega_2$ haben. Der Sinussatz sagt in diesem Falle aus

$$n^2 d\sigma_2 \cos\vartheta_2 d\Omega_2 = d\sigma \cos\vartheta d\Omega \quad . \; . \; . \; 3)$$

Die Länge l_2 des Strahlenbündels bestimmt sich aus der Strahlengeschwindigkeit v in diesem Mittel nach der Gleichung $l_2 : v = l : c$; und erhalten bleiben Energie, Schwingungszahl und Spektralbereich. Aus der Gleichheit der Ausdrücke

$$U = \frac{l_2}{v}\mathfrak{K}_\nu^{(2)} d\sigma_2 \cos\vartheta_2 d\Omega_2 d\nu$$

$$= \frac{l}{c}\mathfrak{K}_\nu d\sigma \cos\vartheta d\Omega d\nu$$

folgt daher

$$\mathfrak{K}_\nu^{(2)} = n^2 \mathfrak{K}_\nu \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 4)$$

Diese von Kirchhoff und Clausius gefundene Beziehung gibt an, wie sich die spezifische Intensität beim Uebertritt eines Strahlenbündels aus dem leeren Raume in ein durchsichtiges Mittel vom Brechungsindex n bei Vermeidung von Reflexionsverlusten ändert.

Auch dieser Vorgang ist umkehrbar. Wir können ja das Strahlenbündel wieder unter Benutzung des Polarisationswinkels in den leeren Raum überführen und ihm dort mit Hilfe vollkommener Spiegel die alte Brennfläche $d\sigma$ und den alten Wert für den Winkel ϑ geben. Nach dem Sinussatz 3 wird auch sein Oeffnungswinkel der gleiche und es unterscheidet sich in keiner Weise von seinem Anfangszustand. Infolgedessen ist auch die Entropie in dem durch Index 2 gekennzeichneten Zustand so groß wie am Anfang. D. h. nach 2

$$S = \frac{l_2}{v}\mathfrak{L}_\nu^{(2)} d\sigma_2 \cos\vartheta_2 d\Omega_2 d\nu = \frac{l}{c}\mathfrak{L}_\nu d\sigma \cos\vartheta d\Omega d\nu$$

Wir schließen daraus und aus 3

$$\mathfrak{L}_\nu^{(2)} = n^2 \mathfrak{L}_\nu \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; 5)$$

Nach 4 und 5 ist $\frac{\mathfrak{L}_\nu^{(2)}}{n^2}$ eine universelle Funktion von $\frac{\mathfrak{K}_\nu^{(2)}}{n^2}$ und ν, da $\mathfrak{L}_\nu$ nur von $\mathfrak{K}_\nu$ und ν abhängt. Haben wir also für den leeren Raum ($n = 1$) $\mathfrak{L}_\nu$ als Funktion von $\mathfrak{K}_\nu$ und ν bestimmt, so haben wir auch das entsprechende Problem für jedes andere durchsichtige Mittel gelöst.

5. **Die Umkehrbarkeit der Spiegelung und Brechung.** In Nr. 4 haben wir schon gesehen, daß die vollkommene Spiegelung und die vollkommene Brechung umkehrbare Vorgänge sind. Im allgemeinen freilich treten beide Erscheinungen gemeinsam auf und führen zu einer Zerlegung des einfallenden Strahlenbündels in zwei getrennte. Es fragt sich, ob dabei die Entropie zunimmt. Die Entscheidung über diese Frage liegt in der Möglichkeit von Interferenzerscheinungen, welche eine derartige Zerlegung vollständig rückgängig machen. Wir wollen diese nur für einen bestimmten Fall dartun. Ist z. B. in Figur 1 P eine planparallele Platte aus vollkommen durchsichtigem Material, an welcher sich das unter 45 Grad einfallende Strahlenbündel $\mathfrak{K}$ (dieser Buchstabe mag gleichzeitig das Strahlenbündel und seine spezifische Intensität

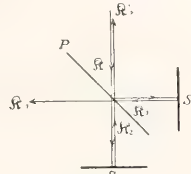


Fig. 1.

bezeichnen) in ein gespiegeltes und hindurchgelassenes Bündel $\mathfrak{K}_1$ und $\mathfrak{K}_2$ spaltet, sind ferner S_1 und S_2 vollkommen reflektierende, ebene Spiegel, welche diese Strahlen in ihre eigene Richtung zurückwerfen, so entstehen durch abermalige Spiegelung und Brechung an P vier Strahlen, von denen aber je zwei sich völlig überdecken und miteinander interferieren. Das Ergebnis der Interferenzstrahlen $\mathfrak{K}_1'$ und $\mathfrak{K}_2'$, deren Intensitäten wir berechnen wollen.

Ist r das Reflexionsvermögen der Platte P, so ist

$$\mathfrak{K}_1 = r\mathfrak{K}, \; \mathfrak{K}_2 = (1-r)\mathfrak{K}$$

Die beiden zu $\mathfrak{K}_1'$ zusammentretenden Strahlenbündel hätten infolgedessen jedes für sich die spezifische Intensität $r(1-r)\mathfrak{K}$, da jedes von ihnen eine Spiegelung und Brechung erlitten hat. Liegen die Spiegel S_1 und S_2 genau symmetrisch zur Platte P, so haben sie offenbar auch die gleichen Wege zurückgelegt und interferieren mit der Phasendifferenz 0. Infolgedessen resultiert eine Intensität 4mal so groß als die des einzelnen Bündels; d. h. es ist

$$\mathfrak{K}_1' = 4r(1-r)\mathfrak{K}.$$

Die spezifische Intensität $\mathfrak{K}_2'$ findet man dann am einfachsten aus dem Energieprinzip, welches $\mathfrak{K}_1' + \mathfrak{K}_2' = \mathfrak{K}$ verlangt:

$$\mathfrak{K}_2' = (1-2r)^2\mathfrak{K}.$$

Nun wählen wir $r = \frac{1}{2}$. Dann wird $\mathfrak{K}_1' = \mathfrak{K}$, $\mathfrak{K}_2' = 0$, d. h., der Erfolg der ersten Spiegelung und Brechung an P, die Zerlegung des einfallenden Strahlenbündels, wird durch die zweite Spiegelung und Brechung und die dabei stattfindende Interferenzerscheinung völlig rückgängig gemacht. Spiegelung und Brechung sind somit, soweit keine absorbierenden Körper dabei in Betracht kommen, umkehrbare Vorgänge.

Zu bemerken ist, daß, wenn wir auf Grund der später abzuleitenden Entropieformel die Entropie der Strahlenbündel $\mathfrak{K}_1$ und $\mathfrak{K}_2$ additiv zur Gesamtentropie zusammensetzen wollten, wir eine Entropie**zunahme** als Erfolg der ersten Spiegelung und Brechung, eine Entropie**abnahme** als Ergebnis der zweiten fänden. Dieser Widerspruch mit dem Entropieprinzip zeigt uns, daß die additive Zusammensetzung der Entropien zweier Strahlenbündel hier nicht berechtigt ist.

Es hängt dies offenbar damit zusammen,

daß die Strahlenbündel $\mathfrak{K}_1$ und $\mathfrak{K}_2$ kohärent sind; dies ist ja die wesentliche Bedingung dafür, daß Interferenzerscheinungen zwischen ihnen möglich sind. Inkohärente Strahlen ließen sich nicht in der geschilderten Art vereinen. Man versteht dies Versagen der Additionstheorems auch ohne weiteres, wenn man an die statistische Bedeutung der Entropie denkt, wie in dem Artikel „Statistik" dieses Werkes auseinander gesetzt ist. In einem System kohärenter Strahlenbündel darf man also die Entropie nicht als Summe der Entropien der Teile berechnen, vielmehr ist sie gleich der Entropie desjenigen Strahlenbündels, aus welchem die kohärenten Bündel entstanden sind und zu dem sie sich durch geeignete Interferenzerscheinungen wieder zusammensetzen lassen. Nur für völlig inkohärente Strahlenbündel ist der Satz von der Additivität der Entropie gültig.

Es könnte danach vielleicht etwas zweifelhaft erscheinen, ob es richtig war, die Entropien zweier Strahlenbündel zu addieren, welche von der gleichen Brennfläche $d\sigma$ nach verschiedenen Richtungen ausgehen; denn schon aus Stetigkeitsgründen leuchtet ein, daß zwei in der Richtung nahe benachbarte Strahlenbündel nicht völlig inkohärent sein können. Jedoch zeigt eine leichte geometrische Ueberlegung, daß dies Bedenken gegenstandslos wird, wenn wir die Produkte $d\sigma \cos\vartheta d\Omega$ nicht zu klein wählen. Es soll an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen werden.

6. **Das Strahlungsgleichgewicht in einem Hohlraum (Kirchhoffsches Gesetz).** Wir denken uns einen vollkommen leeren, von beliebig beschaffenen Wänden eingeschlossenen Hohlraum und fassen den Strahlungszustand in ihm für einen beliebigen Moment ins Auge. Wir können diesen Zustand auf diese Weise beschreiben, daß wir einen ebenen Querschnitt durch den Hohlraum legen, ihn in Elemente $d\sigma$ einteilen und nach allen denjenigen Strahlenbündeln fragen, welche ein solches Element $d\sigma$ zur Brennfläche haben. Jedes Strahlenbündel hat dann eine durch die Gestalt des Hohlraums, durch seine Richtung und die Lage seiner Brennfläche bestimmte Länge l. Die Energie und Entropie des betrachteten Strahlungszustandes finden wir durch Addition über alle derartigen Strahlenbündel. Führen wir diese Addition so aus, daß wir zunächst über alle körperlichen Winkel, sodann nach $d\sigma$ über den ebenen Querschnitt und schließlich über alle Spektralbereiche $d\nu$ integrieren, so finden wir aus 1 und 2:

$$U = \frac{1}{c}\int_0^\infty d\nu \int d\sigma \int d\Omega . l . (\mathfrak{K}_\nu + \mathfrak{K}'_\nu) \cos\vartheta$$

$$S = \frac{1}{c}\int_0^\infty d\nu \int d\sigma \int d\Omega . l . (\mathfrak{L}_\nu + \mathfrak{L}'_\nu) \cos\vartheta$$

Die spezifischen Intensitäten $\mathfrak{K}_\nu$ und $\mathfrak{K}_\nu'$ beziehen sich dabei auf zwei zusammenfallende, aber senkrecht zueinander polarisierte Strahlenbündel, desgleichen die spezifischen Entropiestrahlungen $\mathfrak{L}_\nu$ und $\mathfrak{L}_\nu'$.

Wir fragen nun, welcher von allen Zuständen, deren Gesamtenergie U ist, die größte Entropie besitzt; in diesem Zustande ist die Hohlraumstrahlung im thermodynamischen Gleichgewicht. Wir müssen dazu die Bedingungen aufsuchen, unter welchen für alle möglichen Veränderungen $\delta S = 0$ ist, wenn gleichzeitig $\delta U = 0$ ist. Nun bestehen die möglichen Veränderungen nur darin, daß sich $\mathfrak{K}_\nu$ und $\mathfrak{K}_\nu'$ um $\delta\mathfrak{K}_\nu$ und $\delta\mathfrak{K}_\nu'$ ändern. Diese Aenderungen müssen der Bedingung

$$\delta U = \frac{1}{c}\int_0^\infty d\nu \int d\sigma \int d\Omega l (\delta\mathfrak{K}_\nu + \delta\mathfrak{K}'_\nu) \cos\vartheta = 0$$

gehorchen. Soll nun gleichzeitig

$$\delta S = \frac{1}{c}\int_0^\infty d\nu \int d\sigma \int d\lambda l$$

$$\times \left(\frac{\partial\mathfrak{L}_\nu}{\partial\mathfrak{K}_\nu}\delta\mathfrak{K}_\nu + \frac{\partial\mathfrak{L}'_\nu}{\partial\mathfrak{K}'_\nu}\delta\mathfrak{K}'_\nu\right)\cos\vartheta = 0$$

sein, so muß offenbar

$$\frac{\partial\mathfrak{L}_\nu}{\partial\mathfrak{K}_\nu} = \tau \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 6)$$

eine von der Schwingungszahl, der Strahl- und der Polarisationsrichtung sowie der Lage der Brennfläche unabhängige, allen Strahlenbündeln gemeinsame Konstante sein. Da τ wie $\mathfrak{L}_\nu$ selbst nur von $\mathfrak{K}_\nu$ und ν abhängt, schließen wir daraus zunächst, daß alle Strahlenbündel der gleichen Schwingungszahl auch die gleiche spezifische Intensität haben müssen.

Dies gilt keineswegs nur, wenn wir zwei Strahlenbündel miteinander vergleichen, deren Brennflächen Teile desselben ebenen Querschnittes sind. Vielmehr zeigt eine leichte geometrische Betrachtung, daß in diesem Falle zwei ganz beliebige Strahlenbündel in dem Hohlraum, wenn sie gleiche Schwingungszahl haben, in der spezifischen Intensität übereinstimmen. Die Energiedichte $u_\nu d\nu$ der monochromatischen Strahlung von der Schwingungszahl ν wird unter solchen Umständen offenbar unabhängig vom Ort zu $\mathfrak{K}_\nu$ proportional. Es läßt sich leicht beweisen, daß

$$u_\nu = \frac{8\pi}{c}\mathfrak{K}_\nu \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 6a)$$

ist. Ganz entsprechend gilt für die Entropiedichte $\mathfrak{s}_\nu$ die Formel

$$\mathfrak{s}_\nu = \frac{8\pi}{c}\mathfrak{L}_\nu \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 6b)$$

sie hängt danach in ganz ähnlicher Weise von u_ν und ν ab, wie $\mathfrak{L}_\nu$ von $\mathfrak{K}_\nu$ und ν; denn es gilt

$$\frac{\partial\mathfrak{s}_\nu}{\partial u_\nu} = \frac{\partial\mathfrak{L}_\nu}{\partial\mathfrak{K}_\nu},$$

und im Falle des thermodynamischen Gleichgewichtes zwischen allen Schwingungszahlen nach 6

$$\frac{\partial\mathfrak{s}_\nu}{\partial u_\nu} = \tau \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 6c)$$

wo, wie schon gesagt, τ von der Schwingungszahl unabhängig ist.

Es ist nun leicht, die Bedeutung der Konstanten τ zu ermitteln. Soll Gleichgewicht nicht nur

innerhalb der Strahlung, sondern auch zwischen ihr und der Wandung des Hohlraums herrschen (wir setzen stillschweigend voraus, daß die Wandung für sich im Gleichgewicht, d. h. überall auf derselben Temperatur T ist), so muß auch für solche kleine Veränderungen, bei welchen Energie zwischen der Strahlung und der Hülle ausgetauscht wird, die Variation der gesamten Entropie verschwinden. D. h. es muß

$$\delta S + \delta S_h = 0$$

sein, wenn

$$\delta U + \delta U_h = 0$$

(der Index h deutet auf die Hülle hin) ist. Da

$$\delta S = \delta \int_0^\infty d\nu \int dV \mathfrak{s}_\nu = \int_0^\infty d\nu \int dV \frac{\partial \mathfrak{s}_\nu}{\partial u_\nu} \delta u_\nu$$

$$\delta U = \delta \int d\nu \int dV u_\nu = \int d\nu \int dV \delta u_\nu,$$

so folgt aus der ersten dieser Gleichungen nach 6

$$\tau \delta U + \delta S_h = 0$$

Da ferner nach der Definition der Entropie eines Körpers hier, wo keine Volumenänderungen stattfinden

$$\delta S_h = \frac{\delta U_h}{T} = \frac{-\delta U}{T}$$

ist, so schließen wir weiter

$$\tau = \frac{1}{T} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7)$$

T ist, um es zu wiederholen, die Temperatur eines Körpers, welcher mit der betrachteten Hohlraumstrahlung im Gleichgewicht ist. Man nennt sie auch die Temperatur dieser Strahlung und überträgt den Begriff sogar auf die Strahlenbündel, aus denen sie besteht. Wie $\mathfrak{L}_\nu$ ist T dann eine Funktion von $\mathfrak{K}_\nu$ und ν allein, oder anders ausgedrückt, man kann aus der Schwingungszahl ν und der Temperatur T eines Strahlenbündels die spezifische Intensität $\mathfrak{K}_\nu$, und damit auch die spezifische Entropiestrahlung $\mathfrak{L}_\nu$ berechnen. Die Beziehungen 6 und 7 enthalten somit die folgende Gleichgewichtsbedingung: Es müssen alle Strahlenbündel im Hohlraum die gleiche Temperatur haben wie die Hülle. Dies ist der Kirchhoffsche Satz; dessen andere Fassung, welche die Gleichheit des Emissions- und Absorptionsvermögen für alle Körper ausspricht, läßt sich, wie bekannt, leicht darauf zurückführen.

Vielleicht erregt an dieser Darstellung Zweifel, daß wir von vornherein die Entropien aller Strahlenbündel addiert haben, ohne Rücksicht auf deren etwaige Kohärenz. Nun haben aber bei gegebener Energie zwei kohärente Strahlenbündel stets eine kleinere Entropie als zwei inkohärente. Durch Einwirkung von Körpern gleicher Temperatur kann man nämlich leicht aus kohärenten Strahlenbündeln inkohärente von gleicher Intensität machen, nicht aber das umgekehrte; der genannte Vorgang ist also mit Entropiezunahme verknüpft. Da wir hier den Zustand maximaler Entropie aufsuchen, durften wir somit von vornherein alle Strahlenbündel als inkohärent voraussetzen, und damit das Additionstheorem der Entropie anwenden.

7. **Das Wiensche Verschiebungsgesetz und das Stephan-Boltzmannsche Gesetz.** Das Hauptproblem der Strahlungstheorie besteht in der Aufsuchung des Zusammenhanges zwischen $\mathfrak{L}_\nu$, $\mathfrak{K}_\nu$, ν, aus welchem man nach den Gleichungen 6 und 7 ohne weiteres den Zusammenhang zwischen $\mathfrak{K}_\nu$, ν, T ableiten kann. Das Kirchhoffsche Gesetz ermöglicht, wenn dieser bekannt ist, nach 6a die Energie der Hohlraumstrahlung als Funktion ihrer Temperatur und zugleich die Verteilung der Energie über das Spektrum anzugeben.

Einen ersten Schritt zur Lösung dieses Problems tut das Wiensche Verschiebungsgesetz. Wir leiten es am einfachsten ab, wenn wir von dem von H. A. Lorentz vorbereiteten, von Einstein ausgesprochenen Relativitätsprinzip Gebrauch machen, demzufolge alle Naturgesetze in einer unendlichen Schar gleichförmig gegeneinander bewegter Raum-Zeitsysteme die gleiche Form haben. Doch sei für den Leser, der sich mit diesem Prinzip noch nicht befreundet hat, bemerkt, daß die weiter unten angegebenen Gleichungen sich auch so deuten lassen, daß ein (ungestrichenes) Strahlenbündel durch senkrechte Reflexion an einem vollkommenen bewegten Spiegel in ein anderes (gestrichenes) verwandelt wird. Es ändert sich dann nur der in 9a) angegebene für das Ergebnis unwesentliche Wert von a.

Im Anschluß an das Relativitätsprinzip leitet sich nun das Verschiebungsgesetz ab wie folgt: Wir betrachten ein und dasselbe Strahlenbündel von zwei verschiedenen Bezugssystemen K und K′ aus. K′ soll sich in der Richtung des Strahlenbündels gegen K mit der Geschwindigkeit v bewegen. Wegen der Gleichberechtigung beider Systeme müssen die Gleichungen 1 und 2 in jedem von ihnen gelten. D. h. für seine Energie und Entropie haben wir die Gleichung:

$$U = \frac{l}{c} \mathfrak{K}_\nu d\sigma \cos\vartheta d\lambda d\nu$$

$$U' = \frac{l'}{c} \mathfrak{K}_\nu' d\sigma' \cos\vartheta' d\lambda' d\nu' \quad . \quad . \quad . \quad 8)$$

$$S = \frac{l}{c} \mathfrak{L}_\nu d\sigma \cos\vartheta d\lambda d\nu$$

$$S' = \frac{l'}{c} \mathfrak{L}_\nu', d\sigma' \cos\vartheta' d\lambda' d\nu' \quad . \quad . \quad . \quad 9)$$

Andererseits läßt sich leicht angeben, wie sich die Energie, die Entropie, die Schwingungszahl usw. von dem einen auf das andere System umrechnen. Setzt man zur Abkürzung

$$\sqrt{\frac{c-v}{c+v}} = a, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 9a)$$

so ist

$$\frac{U'}{U} = \frac{\nu'}{\nu} = \frac{d\nu'}{d\nu} = a \quad \frac{l'}{l} = \frac{1}{a} \quad \frac{d\lambda'}{d\lambda} = a^2$$

$$d\sigma' \cos\vartheta' = d\sigma \cos\vartheta.$$

Daraus folgt nach 8

$$\frac{\mathfrak{K}'_{\nu'}}{\mathfrak{K}_\nu} = a^3 \text{ d. h. } \frac{\mathfrak{K}'_{\nu'}}{\nu'^3} = \frac{\mathfrak{K}_\nu}{\nu^3} \quad . \quad . \quad . \quad 9b)$$

Die spezifischen Intensitäten des Strahlenbündels in den beiden Bezugssystemen verhalten sich wie die dritten Potenzen der entsprechenden Schwingungszahlen. Im Gegensatz zur Energie bleibt aber die Entropie bei der Umrechnung unverändert (S = S′), so daß aus 9 folgt:

$$\frac{\mathfrak{L}'_\nu}{\mathfrak{L}_\nu} = a^2 \text{ d. h. } \frac{\mathfrak{L}'_{\nu'}}{\nu'^2} = \frac{\mathfrak{L}_\nu}{\nu^2}.$$

Setzen wir also

$$\mathfrak{L}_\nu = \nu^2 f, \quad \mathfrak{L}'_\nu = \nu^2 f'$$

so muß $f = f'$ sein, andererseits f wie $\mathfrak{L}_\nu$ selbst von $\mathfrak{K}$ und ν abhängen, und in der gleichen Art f' von $\mathfrak{K}_\nu'$ und ν'. Offenbar sind beide Forderungen nach 9a nur dann erfüllt, wenn f die beiden Argumente $\mathfrak{K}_\nu$ und ν nur in der Kombination $\frac{\mathfrak{K}_\nu}{\nu^3}$ enthält. Also ist

$$\mathfrak{L}_\nu = \nu^2 f\left(\frac{\mathfrak{K}_\nu}{\nu^3}\right) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 10)$$

Die Form der Funktion f läßt sich an dieser Stelle noch nicht weiter bestimmen.

Aus 10 schließen wir nach 6 und 7

$$\frac{1}{T} = \frac{\partial \mathfrak{L}_\nu}{\partial \mathfrak{K}_\nu} = \frac{1}{\nu}\,\dot{f}\left(\frac{\mathfrak{K}_\nu}{\nu^3}\right)$$

wobei $\dot{f}$ die Dirivierte von f ist. Die Auflösung dieser Gleichung nach $\mathfrak{K}_\nu$ hat die Form

$$\mathfrak{K}_\nu = \nu^3 \varphi\left(\frac{\nu}{T}\right) \quad \ldots\ldots\ldots \quad 11)$$

Man ersieht aus 6a und 6b leicht, daß bei einer in allen Richtungen gleich intensiven Strahlung von der Schwingungszahl ν für deren Energie- und Entropiedichte ganz ähnliche Formeln gelten, nämlich

$$\mathfrak{s}_\nu = \nu^2 F\left(\frac{u_\nu}{\nu^3}\right) \quad u_\nu = \nu^3 \Phi\left(\frac{\nu}{T}\right) \ldots \quad 12)$$

woraus weiterhin

$$\mathfrak{s}_\nu = \nu^2 \psi\left(\frac{\nu}{T}\right) \quad \ldots\ldots \quad 13)$$

folgt.

Bei der Gleichgewichtsstrahlung im Hohlraume, welche durch die Konstanz der Temperatur für alle Schwingungszahlen gekennzeichnet ist, folgt hieraus für die gesammte Energie- und Entropiedichte:

$$u = \int_0^\infty u_\nu\, d\nu = \int_0^\infty \nu^3 \Phi\left(\frac{\nu}{T}\right) d\nu$$

$$s = \int \mathfrak{s}_\nu\, d\nu = \int \nu^2 \psi\left(\frac{\nu}{T}\right) d\nu$$

oder, wenn man $x = \frac{\nu}{T}$ als Integrationsvariable einführt,

$$u = T^4 \int_0^\infty x^3 \Phi(x)\, dx \quad s = T^3 \int_0^\infty x^3 \Phi(x)\, dx \quad 14)$$

Die beiden hier auftretenden Integrale sind reine, von allen physikalischen Bestimmungsstücken unabhängige Zahlen.

Gleichung 14 enthält das Stephan-Boltzmannsche Gesetz, demzufolge die Energie $U = uV$ der Hohlraumstrahlung zur vierten Potenz der absoluten Temperatur proportional ist. Gleichung 11 oder 12 hingegen gestattet, die Energieverteilung über das Spektrum für die Hohlraumstrahlung zu bestimmen, wenn diese für eine einzige Temperatur bekannt ist; denn unter dieser Voraussetzung läßt sich die Form der Funktionen φ und F angeben. Richten wir unser Augenmerk besonders auf die Stelle stärkster Intensität ν_{max} im Spektrum, so zeigt sich, daß ν_{max} sich bei einer Aenderung der Temperatur proportional zu T verschiebt, während die Höhe des Maximums zu T^3 wächst. Aus diesem Grunde bezeichnet man Gleichung 11 als Verschiebungsgesetz.

8. **Das Plancksche Strahlungsgesetz.** Zur Ableitung des Strahlungsgesetzes selbst muß man noch erheblich tiefer gehen. Hierzu reicht die reine Thermodynamik überhaupt nicht aus, sondern sie bedarf der Ergänzung durch die Statistik. Aber die von Boltzmann und Gibbs ausgebildete Statistik würde zu einem völlig unmöglichen Strahlungsgesetz führen (vgl. den Artikel „Statistik"). Es ist das kaum hoch genug zu schätzende Verdienst Plancks, der Statistik durch eine kühne Hypothese einen neuen Weg gewiesen zu haben.

Diese Hypothese hat in ihrer ersten Form (1901) zum Inhalt, daß die Absorption und Emission von Strahlung durch die Körper nur nach bestimmten, von der Schwingungszahl abhängigen elementaren Quanten vor sich gehen. Später (1912) hat Planck diese Annahme auf die Emission allein beschränkt. Welche Fassung vorzuziehen ist, soll hier nicht entschieden werden. Die Ansätze der an die Plancksche Hypothese anknüpfenden Quantentheorie sind noch zu wenig sicher, um ein endgültiges Urteil darüber zuzulassen. Wir werden uns hier im wesentlichen an die erste Ableitung des Strahlungsgesetzes von Planck halten, diese aber ein wenig auf einem von Debye beschrittenen Wege abändern.

In 6 haben wir weder über die Gestalt des Hohlraumes noch über die Beschaffenheit der Wände eine Annahme gemacht. Das Ergebnis zeigt, daß beides keinerlei Einfluß mehr hat. Jetzt wollen wir ihn als einen Würfel von der Seitenlänge l begrenzt von vollkommen spiegelnden Wänden denken. In einem solchen Hohlraum könnte sich zunächst jeder Strahlungszustand erhalten, mag seine spektrale Energieverteilung auch noch so weit vom Gleichgewichtszustand abweichen. Denn da die Wände mit der Strahlung nicht in Energieaustausch treten können, können die Strahlungen verschiedener Schwingungszahl auch untereinander nicht in einen Energieaustausch treten, welcher ja stets durch Materie vermittelt werden muß. Dennoch stellte ein solcher Zustand kein stabiles Gleichgewicht vor. Die Anwesenheit des geringsten Stäubchens würde ihn mit der Zeit in den Gleichgewichtszustand überführen, indem dies einer zu starken Strahlung durch Absorption Energie entzöge, durch Emission diese den zu schwachen Strahlen zuführte. Geht beides nur quantenhaft vor sich, so muß die Energie der Strahlung von der Schwingungszahl v stets ein ganzes vielfaches des Elementarquantums ε_ν sein.

Nun läßt sich in dem beschiedenen Hohlraum jeder Strahlungszustand auffassen als Ueberlagerung der elektromagnetischen Eigenschwingungen dieses Hohlraumes Die letzteren entsprechen durchaus den elastischen Eigenschwingungen einer gespannten Saite. Ganz wie bei dieser liegen die Schwingungszahlen sehr dicht beieinander, wenn, wie wir voraussetzen, die Länge l groß ist gegen ihre Wellenlänge, und

ganz wie im elastischen Falle hat jede von ihnen zwei Freiheitsgrade. Für die Zahl der Freiheitsgrade, welche zu den Eigenschwingungen im Spektralbereich $d\nu$ gehören, findet man den Wert

$$N d\nu = \frac{8\pi l^3}{c^3}\nu^2 d\nu \quad . \; . \; . \; . \; . \; 15)$$

Die Analogie zu den Eigenschwingungen der Saite geht noch weiter. Die Gesamtenergie eines beliebigen Strahlungszustandes im Hohlraum läßt sich additiv in Anteile der in Betracht kommenden Freiheitsgrade zerlegen. Da nach der Quantenhypothese auf jeden Freiheitsgrad von der Schwingungszahl ν ein ganzes Vielfaches von ε_ν als Energie entfällt, so ist, wenn die Freiheitsgrade des genannten Spektralbereiches $d\nu$ im Durchschnitt $f(\nu)$ Quanten besitzen, die Energie der Strahlung dieses Bereiches

$$U_\nu d\nu = \frac{8\pi l^3}{c^3}\nu^2\varepsilon_\nu f(\nu) d\nu \quad . \; . \; . \; . \; 16)$$

und ihre Dichte

$$u_\nu d\nu = \frac{U_\nu d\nu}{l^3} = \frac{8\pi}{c^3}\nu^2\varepsilon_\nu f(\nu) d\nu \quad . \; . \; 17)$$

Die Entropie dieser Strahlung finden wir aus dem Boltzmannschen Prinzip $S = k \,.\, \log W$ (vgl. den Artikel „Statistik"); W ist dabei die Zahl von Möglichkeiten, die vorhandenen Energiequanten ε_ν auf die Freiheitsgrade des Bereiches $d\nu$ zu verteilen. Die Kombinatorik lehrt:

$$W = \frac{(N d\nu + N f(\nu) d\nu)!}{(N d\nu)!\,(N f(\nu) d\nu)!}$$

Unter der Benutzung der Stirlingschen Näherungsformel findet man daraus für die Entropiedichte dieser Strahlung unter Benutzung von 15

$$\mathfrak{s}_\nu d\nu = \frac{S_\nu d\nu}{l^3}$$

$$= \frac{kN d\nu}{l^3}\Big\{(1 + f)\log(1 + f) - f\log f\Big\}$$

$$= \frac{8\pi}{c^3}k\nu^2\Big\{(1 + f)\log(1 + f) - f\log f\Big\} d\nu$$

Nun muß aber nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz 12 $\mathfrak{s}_\nu$ eine Funktion von der Form $\nu^2 F\left(\frac{u_\nu}{\nu^3}\right)$ sein; f ist nach 17 proportional zu $\frac{u_\nu}{\nu^2\varepsilon_\nu}$. Es muß also

$$\varepsilon_\nu = h\nu \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 18)$$

sein, wobei h eine neue universelle Konstante bedeutet. Durch die Gleichung

$$\mathfrak{s}_\nu = \frac{8\pi}{c^3}k\nu^2\left\{\left(1 + \frac{c^3 u_\nu}{8\pi h\nu^3}\right)\log\left(1 + \frac{c^3 u_\nu}{8\pi h\nu^3}\right) - \frac{c^3 u_\nu}{8\pi h\nu^3}\log\left(\frac{c^3 u_\nu}{8\pi h\nu^3}\right)\right\} \quad . \; . \; . \; . \; 19)$$

ist dann der gesuchte Zusammenhang zwischen $\mathfrak{s}_\nu$ und u_ν gegeben. Nach 6a und 6b folgt daraus die Beziehung zwischen $\mathfrak{L}_\nu$ und $\mathfrak{K}_\nu$:

$$\mathfrak{L}_\nu = \frac{k\nu^2}{c^2}\left\{\left(1 + \frac{c^2\mathfrak{K}_\nu}{h\nu^3}\right)\log\left(1 + \frac{c^2\mathfrak{K}_\nu}{h\nu^3}\right) - \frac{c^2\mathfrak{K}_\nu}{h\nu^3}\log\left(\frac{c^2\mathfrak{K}_\nu}{h\nu^3}\right)\right\}$$

Durch Differentiation schließen wir aus 19) nach 6c und 7

$$\frac{1}{T} = \frac{\partial \mathfrak{s}_\nu}{\partial u_\nu} = \frac{k}{h\nu}\left\{\log\left(1 + \frac{c^3 u_\nu}{8\pi h\nu^3}\right) - \log\left(\frac{c^3 u_\nu}{8\pi h\nu^3}\right)\right\}$$

Die Energiedichte einer nach allen Richtungen gleich intensiven Strahlung von der Schwingungszahl und der Temperatur T wird somit

$$u_\nu = \frac{8\pi}{c^3}\frac{h\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad . \; . \; . \; . \; . \; 20)$$

und für die spezifische Intensität eines Strahlenbündels von derselben Temperatur und Schwingungszahl finden wir nach 6a:

$$\mathfrak{K}_\nu = \frac{1}{c^2}\frac{h\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad . \; . \; . \; . \; . \; 21)$$

In diesen Gleichungen findet das Problem der Strahlungstheorie seine vollständige Erledigung; und wenn trotzdem bis in die jüngste Zeit hinein viel darüber gearbeitet wird, so handelt es sich dabei nicht um die Gültigkeit des Planckschen Strahlungsgesetzes, sondern nur um die Frage, wie die Quantenhypothese in das Gebäude der theoretischen Physik einzupassen ist. Dies Problem aber scheint nach allem, was man weiß, noch weit von seiner Lösung entfernt.

9. **Die ponderomotorischen Wirkungen der Strahlung. Theorie der Kometenschweife.** Die Hohlraumstrahlung übt auf ihre Hülle einen Druck aus, welcher bei der ersten Ableitung des Stephan-Boltzmannschen Gesetzes durch Boltzmann eine wichtige Rolle gespielt hat. Zerlegen wir wie in 5 die Hohlraumstrahlung in Strahlenbündel, so zeigt die Unabhängigkeit ihrer spezifischen Intensität von der Richtung, daß es in der Hohlraumstrahlung keine bevorzugten Richtungen gibt. Freilich, betrachtet man einen einzelnen Moment, so sind hier wie bei jedem elektromagnetischen Feld die Richtungen der elektrischen und der magnetischen Feldstärke ausgezeichnet. Wohl aber gilt der genannte Satz, sofern man über Zeiten mittelt, welche gegen die Periode optischer Schwingungen groß sind. Nun herrscht in jedem elektromagnetischen Felde ein Spannungszustand, welcher durch die Maxwellschen Spannungen bestimmt ist. Für diese sind die Richtungen beider Feldstärken bevorzugte Richtungen. Da aber bei der Mittelung jede Bevorzugung verschwinden muß, kann der mittlere Spannungszustand nur ein allseitig gleicher Druck p (vergleichbar dem hydrostatischen Druck) sein. Sein Wert berechnet sich leicht, wenn man bedenkt, daß für die Maxwellschen Spannungen und die Energiedichte W die Gleichung gilt:

$$p_{xx} + p_{yy} + p_{zz} = W.$$

Nimmt man hinzu, daß bei der Mittelung $p_{xx} = p_{yy} = p_{zz} = p$ werden muß, so folgt

$$p = \frac{1}{3}W$$

Dieser Druck herrscht nicht nur im Innern der Hohlraumstrahlung, sondern wird auch von ihr auf die Hülle ausgeübt, ganz wie wir dies bei einem Gase gewohnt sind.

Dieser Druck muß sich zerlegen lassen in die Anteile der Strahlenbündel, in welche wir in 6 die Hohlraumstrahlung zerlegt haben. So kommen wir zu der Vorstellung, daß ein Strahlenbündel auf jeden Körper, mit dem es in irgend-

welche Beziehungen tritt, ponderomotorische Wirkungen ausübt; gleichgültig, ob es von ihm emitiert, absorbiert oder gespiegelt wird. Schon Maxwell hat den Druck auf vollkommene Spiegel berechnet, und heutzutage sind wir imstande, ganz allgemein die Wirkung auf beliebige Körper anzugeben, mögen sie ruhen oder bewegt sein, solange nur die geometrische Optik anwendbar bleibt. Die Theorie steht dabei in bester Uebereinstimmung mit den Versuchen von Lebedew sowie Nichols und Hull, welche den Strahlungsdruck unmittelbar gemessen haben. Schwieriger wird dessen Berechnung, sowie die von der Strahlung getroffenen Körper so klein werden, daß Beugungserscheinungen auftreten. Für kugelförmige Teilchen haben Schwarzschild und Debye diese Rechnungen durchgeführt. Das Ergebnis, welches sich qualitativ auf Körper beliebiger Gestalt übertragen läßt, wollen wir in der Weise darstellen, daß wir den Druck der Sonnenstrahlung mit der Gravitationskraft vergleichen, welche die Sonne ausübt. Beide Kräfte nehmen umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung ab, so daß dieser Vergleich für alle Entfernungen gilt. Beginnt man dabei bei großen Körpern, wie es etwa die Planeten sind, so ist der Strahlungsdruck ein ganz verschwindender Bruchteil der Anziehung. Aber das Verhältnis ändert sich zugunsten des Strahlungsdruckes mit abnehmenden Dimensionen, weil die Anziehung eine Volumenwirkung, der Strahlungsdruck eine Flächenwirkung ist. Rechnen die Abmessungen nach Lichtwellenlängen, so überwiegt der Strahlungsdruck die Anziehung und zwar gelegentlich um das 40fache. Freilich, läßt man die Dimension noch weiter abnehmen, so wird dies Verhältnis wieder kleiner und bei ganz kleinen Teilchen muß wieder die Anziehung überwiegen.

Auf diesem Sachverhalt hat nun Arrhenius die Theorie der Kometenschweife aufgebaut. Schon von Keppler ist die Ansicht geäußert worden, daß die Materie dieser Schweife von der Sonne abgestoßen wird. Andererseits haben die Astronomen schon lange festgestellt, daß diese aus sehr fein verteilten, kleinen festen Körpern beständen. Die Abstoßungen, die man beobachtet hat, übersteigen die Anziehung manchmal nur wenig, in manchen Fällen aber auch um das 37- und 40fache. So findet die Kepplersche Ansicht in der Lehre vom Strahlungsdruck eine nachträgliche Bestätigung.

Literatur. ***M. Planck***, *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung. Leipzig* [illegible]. *Ann. d. Physik*, **4**, [illegible], *1901*. — ***W. Wien***. *Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften*, **V**, [illegible]. *Ann. d. Physik*, **52**, [illegible], *1894*. — ***M. Laue***, *Ann. d. Physik*, **20**, *365, 1906. Verh. d. D. phys. Ges.*, **9**, [illegible]. — ***M. Abraham***. *Ann. d. Physik*, **14**, [illegible]. — ***P. Debye***. *Ann. d. Physik*, **30**, *57, 1909*; **33**, *1427, 1910*. — ***K. Schwarzschild***. *Münch. Sitz.-Ber.*, [illegible]. — ***Sv. Arrhenius***. *Das Werden der Welten. Leipzig 1908, Kap.* [illegible]. — ***P. Lebedew***, *Ann. d. Phys.*, **6**, *433, 1901*. — ***E. F. Nichols und G. F. Hull***. *Ann. d. Physik*. **12**, [illegible].

M. v. Laue.

Strahlungserregung.

1. Zentra und Träger der Spektra. 2. Elementare Lichtemission im Bandenspektrum. 3. Elementare Lichtemission im Serienspektrum.

1. Zentra und Träger der Spektra. Will man die elementaren Vorgänge zergliedern, welche an einem einzelnen Elektron, Atom oder Molekül zur Erregung von Strahlung führen, so hat man sich zunächst klar zu machen, welches die elementaren Träger der Lichtemission sind und weiter, welche Zentra an diesen Trägern der Herd einer Emission von Lichtenergie sind. Der erste Schritt zur Lösung dieser Frage besteht darin, daß man die vorkommenden Spektra in wenige große Gruppen ordnet (J. Stark, Die elementare Strahlung. Leipzig 1911 S. 42).

Die erste Hauptgruppe von Spektren sind die Serienspektra; es haben sich nämlich in den Spektren zahlreicher Elemente Linien zu Serien zusammenordnen lassen, deren Glieder sich durch eine analytische Formel so zusammenfassen lassen, daß ihre Schwingungszahlen aus einer algebraischen Funktion aufeinanderfolgender ganzer Zahlen sich berechnen. Es hat sich ergeben, daß diese Serienlinien durch ein magnetisches Feld in Komponenten zerlegt werden (Zeeman-Effekt) und daß sie in den Kanalstrahlen bewegte Intensität (Stark-Doppler-Effekt) zeigen. Da es noch zahlreiche andere Linien gibt, die zwar nicht oder wenigstens noch nicht zu Serien zusammengefaßt sind, die indes Zeeman- und Stark-Doppler-Effekt zeigen, so ist es angezeigt, diese „nichtformulierten" Linien ebenfalls zu der Gruppe der Serienlinien zu rechnen.

Die zweite Hauptgruppe von Spektren ist diejenige der Bandenspektra. Ein Typus derselben wird durch die formulierten Bandenspektra dargestellt; für diese lassen sich die Schwingungszahlen der einzelnen Linien aus einer algebraischen Funktion aufeinanderfolgender ganzer Zahlen berechnen, die verschieden ist von der Funktion für die Serienlinien. Diese formulierten Bandenlinien zeigen entweder keinen Zeeman-Effekt oder einen anderen als die Serienlinien, sie zeigen auch keinen Stark-Doppler-Effekt. Da dies auch bei einer großen Zahl anderer Linien der Fall ist, die nicht oder wenigstens noch nicht zu Banden zusammengeordnet sind, so werden diese Linien ebenfalls zu der Gruppe der Bandenspektra gerechnet. In diese Gruppe sind ferner die breiten kontinuierlichen Banden zu verweisen, welche an festen, flüssigen oder gelösten Körpern beobachtet werden und, wie für viele Fälle erwiesen ist, den Linienbanden dieser Körper im Dampfzustand entsprechen.

Eine dritte Gruppe von Spektren sind die Röntgenstrahlen, doch soll von deren Besprechung an dieser Stelle abgesehen, vielmehr lediglich auf die von Stark (Elementare Strahlung, S. 83 u. 238) gegebene zusammenfassende Darstellung verwiesen werden. Zweifelhaft ist die Zugehörigkeit der Absorptionslinien gewisser seltener Erden. Von ihnen sei hier ebenfalls nicht weiter die Rede.

Nach einer Hypothese von J. Stark (J. Stark, Die Elektrizität in Gasen, J. A. Barth, Leipzig 1902, S. 457) sind die Träger der Serienspektra positive Atomionen, in gewissen Fällen vielleicht auch positive Molekülionen. Diese Hypothese darf heute als erwiesen gelten. Es gibt nämlich Kanalstrahlen, welche nur aus positiven Atomstrahlen bestehen und gleichzeitig bewegte Intensität (Stark-Doppler-Effekt) ihrer Serienlinien zeigen (O. Reichenheim, Ann. d. Phys. 33, 747, 1910); wie sich ferner ergeben hat, nimmt die bewegte Intensität der Serienlinien zu, wenn die spez. Zahl der positiven Strahlen auf Kosten der neutralen Strahlen zunimmt (J. Stark, A. Fischer und H. Kirschbaum, Ann. d. Phys. 40, 499, 1913). Weiter haben sich beim Quecksilber gewisse Linien dem einwertigen, andere dem zweiwertigen, andere dem dreiwertigen und gewisse sogar dem vierwertigen Quecksilberatomion zuordnen lassen (J. Stark, W. Hermann, und S. Kinoshita, Ann. d. Phys. 21, 462, 1906; J. Stark, G. Wendt, H. Kirschbaum und R. Künzer, Ann. d. Phys. 1913); ebenso wurden drei Serien des Heliums dem ein-, drei andere dem zweiwertigen positiven Heliumatomion zugeordnet (J. Stark, A. Fischer und H. Kirschbaum, Ann. d. Phys. 40, 499, 1913), ähnlich die Dupletserien des Aluminiums dem einwertigen, gewisse Linien dem zwei-, andere Linien dem dreiwertigen positiven Aluminiumatomion (J. Stark, R. Künzer, und G. Wendt, Berl. Ber. 1913, 430). Man kann darum von ein-, zwei- oder mehrwertigen Serienlinien sprechen.

Die Zentra der Serienlinien sind gemäß der Größe und dem Vorzeichen des Zeeman-Effekts negative Elektronen. Man hat demnach anzunehmen, daß in den positiven Atomionen negative Elektronen in einer gewissen Anordnung und Bewegung vorkommen, welchen die Frequenzen der Serienlinien eigentümlich sind (J. Stark, Elementare Strahlung, S. 144).

Die Zentra der Bandenspektra sind nach einer Hypothese von J. Stark (Ann. d. Phys. 14, 525, 1904; Phys. Ztschr. 7, 355, 1906; 8, 81, 1907; 9, 85, 1908) ebenfalls negative Elektronen, indes haben diese eine andere Beziehung zum Atom als die Serien- oder „Ring"-Elektronen; sie liegen nämlich an der Oberfläche der chemischen Atome, sind von ihrer Bindungsstelle abtrennbar und vermitteln zwischen verschiedenen chemischen Atomen die Zusammenbindung zu chemischen Molekülen; sie werden darum Valenzelektronen genannt. Auch diese Hypothese kann heutzutage als erwiesen gelten. Aus dem Zusammenhang zwischen lichtelektrischem Effekt und Bandenspektren (J. Stark, Phys. Ztschr. 9, 85, 1908; J. Stark und W. Steubing, Phys. Ztschr. 9, 481, 661, 1908), ferner aus dem Zusammenhang zwischen der Bindungsart chemischer Valenzen und ihren ultravioletten Banden folgt mit Sicherheit, daß die Schwingungszentra der Bandenspektra negative Valenzelektronen sind (J. Stark, W. Steubing, C. J. Enklaar und P. Lipp, Jahrb. d. Rad. u. El. 10, 139, 1913; J. Stark und P. Lipp, Jahrb. d. Rad. u. El. 10, 175, 1913; J. Stark und P. Levy, Jahrb. d. Rad. u. El. 10, 188, 1913).

Die Träger der Bandenspektra sind demnach die Träger der Valenzelektronen, also Atome oder Moleküle, mögen sie als Ganzes ungeladen sein oder an einer anderen Valenzstelle durch Verlust eines Elektrons eine positive Ladung aufweisen.

2. Elementare Lichtemission im Bandenspektrum. Ein Valenzelektron kann von seiner Bindungsstelle teilweise oder gänzlich abgetrennt werden. Im zweiten Falle wird es frei und kann sich als mehr oder minder schneller Kathodenstrahl von seinem Atom entfernen. Bei der teilweisen oder gänzlichen Abtrennung von seiner Bindungsstelle gewinnt das Valenzelektron potentielle Energie in bezug auf diese; bei seiner Wiederanlagerung an seine Bindungsstelle kann es seine potentielle Energie bei den Schwingungen relativ zur Bindungsstelle ganz oder zum Teil in Form von Lichtenergie von sich abstoßen.

Dieses Prinzip der elementaren Lichtemission im Bandenspektrum (J. Stark, Ann. d. Phys. 14, 525, 1904; 29, 316, 1909; Die Elektrizität in Gasen S. 447; Phys. Ztschr. 8, 81, 1907; 9, 85, 1908) ist in einer Reihe von Einzelfällen wirksam. Die teilweise oder gänzliche Abtrennung eines Valenzelektrons kann erstens durch die Absorption von eingestrahlter Lichtenergie an dem Valenzelektron, also durch Absorption von Licht in einem Bandenspektrum bewirkt werden. Ist dies der Fall, dann ist die Lichtabsorption begleitet oder gefolgt von einer Lichtemission im Bandenspektrum. Wir erhalten somit die Erscheinung der Fluoreszenz, wenn die Wiederanlagerung in weniger als $^1/_{10}$ Sekunde nach der Abtrennung erfolgt, die Erscheinung der Phosphoreszenz, wenn die Wiederanlagerung der nach ihrer gänzlichen Abtrennung in

der Nähe ihrer Bindungsstellen festgehaltenen Valenzelektronen erst längere Zeit nach der Lichtabsorption sich vollzieht.

Im Falle der Fluoreszenz hat gänzliche Abtrennung der Valenzelektronen und damit Ionisierung oder lichtelektrischer Effekt an dem absorbierenden Körper statt, wenn die Lichtabsorption in den kürzesten Banden-Wellenlängen der Elektronen sich vollzieht. Demgemäß hat eine systematische Untersuchung einen Zusammenhang zwischen Ionisierung bezw. lichtelektrischem Effekt und Fluoreszenz aufdecken können (aromatische Verbindungen: J. Stark und W. Steubing, Phys. Ztschr. 9, 481, 661, 1908; J. Stark, Phys. Ztschr. 10, 614, 1909; Sauerstoff: Ph. Lenard, Ann. d. Phys. 1, 486, 1900 3, 298, 1900; W. Steubing, Ann. d. Phys. 33, 553, 1909; Quecksilberdampf: W. Steubing, Phys. Ztschr. 10, 787, 1909).

Erfolgt die Lichtabsorption in den langwelligen Banden eines Valenzelektrons, so wird dieses nicht gänzlich abgetrennt, sondern nur teilweise. Es tritt in diesem Falle keine gleichzeitige Ionisierung auf. Während indes im ersten Falle das Fluoreszenzlicht unpolarisiert ist, auch wenn das absorbierte Licht polarisiert ist, erscheint in diesem Fall ein Teil des Fluoreszenzlichtes polarisiert, wenn es das erregende Licht ist (R. W. Wood, Phys. Ztschr. 9, 590, 1908; J. Franck und G. Hertz, Verh. d. D. Phys. Ges. 14, 423, 1912). Auch zeigen sich in diesem Falle eigenartige Beziehungen zwischen ausgewählten Frequenzen des erregenden Lichtes und des Fluoreszenzlichtes. Derartige Erscheinungen sind sehr eingehend von R. W. Wood untersucht und unter der Bezeichnung Resonanzstrahlung beschrieben worden (R. W. Wood, Phil. Mag. 4, 425, 1902; 6, 259, 1903; 10, 52, 513, 1905; Phys. Ztschr. 9, 450, 1908; 11, 1195, 1910).

Hinsichtlich der Fähigkeit, durch Lichtabsorption zu Fluoreszenz erregt werden zu können, unterscheiden sich demgemäß zwei Arten von Absorptionsbanden voneinander. Die Banden der einen Art, kurzwellige Banden, die zumeist nach längeren Wellen zu abschattiert sind, werden durch Lichtabsorption zu Fluoreszenz angeregt; gleichzeitig mit ihnen geben dann auch die mit ihnen gekoppelten Banden zweiter Art, langwellige Banden, die zumeist nach kürzeren Wellen abschattiert sind, Fluoreszenz; für sich allein können die langwelligen Banden nicht oder nur in sehr geringer Intensität durch Lichtabsorption in ihnen selbst zu Fluoreszenz angeregt werden (J. Stark, Elementare Strahlung S. 224).

Im Falle der Phosphoreszenz hat immer gänzliche Abtrennung von Valenzelektronen statt; darum ist sie immer mit einem lichtelektrischen Effekt verknüpft. Ausgedehnte Untersuchung und weitgehende Aufklärung der Erscheinungen der Phosphoreszenz verdanken wir Ph. Lenard und seinen Mitarbeitern (Ph. Lenard und V. Klatt, Ann. d. Phys. 15, 425, 525, 633, 1904; Ph. Lenard und S. Saeland, Ann. d. Phys. 28, 476, 1909; Ph. Lenard, K. Onnes und W. E. Pauli, Proc. Amsterdam 12, 157, 1909; Ph. Lenard, Ann. d. Phys. 31, 641, 1910; Ber. Heidelberg. Ak. 1912, Nr. 5).

Die teilweise oder gänzliche Abtrennung von Valenzelektronen kann zweitens durch den Stoß von Kathoden- oder Kanalstrahlen erfolgen; dieser Fall von Lichterregung im Bandenspektrum ist früher vor allem unter dem Namen Elektrolumineszenz hauptsächlich von E. Wiedemann, G. C. Schmidt und E. Goldstein (E. Wiedemann, Wied. Ann. 9, 157, 1880; H. Ebert und E. Wiedemann, Wied. Ann. 50, 221, 1893; E. Wiedemann und G. C. Schmidt, Wied. Ann. 54, 604, 1895; 56, 18, 201, 1895; G. C. Schmidt, Ann. d. Phys. 9, 703, 1902; 13, 622, 1904; E. Goldstein, Berl. Ber. 1876, 279; 1900, 818; Verh. d. D. Phys. Ges. 6, 156, 185, 1904; 9, 598, 1907; 12, 376, 1910) an sehr vielen Beispielen untersucht worden. Die von den elektrischen Strahlen getroffene Substanz kann dampfförmig, flüssig oder fest sein. Bei dieser Art von Anregung der Lichtemission im Bandenspektrum können noch mehr wie im Falle der Lichtabsorption chemische Umlagerungen sich störend bemerkbar machen.

Die schnellen Kathodenstrahlen in der negativen Glimmschicht liefern bei mehreren Elementen, z. B. Stickstoff und Sauerstoff, neben den Bandenspektren, welche die langsamen Kathodenstrahlen in der positiven Säule zur Emission bringen, auch noch weitere Bandenspektra, welche in der positiven Säule fehlen oder nur sehr schwach sind. Die Erklärung hierfür ist darin zu suchen, daß die schnellen Kathodenstrahlen neben einwertigen auch noch zwei- oder höherwertige positive Atomionen durch ihren Stoß zu schaffen vermögen; die Wiederanlagerung eines Elektrons an ein zwei- oder höherwertiges Ion ist wahrscheinlich mit der Emission eines anderen Bandenspektrums verknüpft als die Wiederanlagerung eines Elektrons an ein einwertiges Atomion (Ann. d. Phys. 14, 525, 1904; 26, 827, 1908).

In den Vorgang der Wiederanlagerung eines abgetrennten Valenzelektrons und somit in den Vorgang der elementaren Lichtemission können Atome, Radikale oder Moleküle in der Nähe des sich anlagernden Elektrons hineinspielen. Stoßen diese nämlich auf das schwingend sich anlagernde Elektron oder heften sie sich dank wechselseitiger Kräfte an dasselbe, so geht die bei der Anlagerung frei werdende Energie des Elek-

trons für den Zweck der Lichtemission teilweise oder ganz verloren, indem sie in kinetische Energie der störenden oder angehefteten Atome oder Moleküle übergeht (J. Stark, Ztschr. f. Elektroch. 13, 514, 1911). So erklären sich folgende Erscheinungen. Steigerung der Temperatur, also Vermehrung der Zahl der molekularen Zusammenstöße setzt die Intensität der Fluoreszenz herab (R. W. Wood, Physik. Ztschr. 10, 469, 1909). Die Anwesenheit elektronegativer Gruppen in einem aromatischen Molekül vermindert die Intensität der Fluoreszenz des Benzolringes (H. Ley und K. v. Engelhardt, Ztschr. f. phys. Chem. 74, 1, 1910). Beimischung eines Gases zu Quecksilber-, Anthrazen- oder Joddampf verringert deren Fluoreszenz und zwar bringen diese Wirkung elektronegative Gase sehr viel stärker hervor als elektropositive (F. S. Elston, Astrophys. Journ. 15, 155, 1907; R. W. Wood, Verh. d. D. Phys. Ges. 13, 12, 1911; R. W. Wood und J. Franck, Verh. d. D. Phys. Ges. 13, 79, 1911). Das Bandenleuchten von Gasen in der positiven Säule des Glimmstromes oder unter dem Stoß der α-Strahlen wird durch den Zusatz elektronegativer Gase beträchtlich vermindert (P. Lewis, Wied. Ann. 69, 398, 1899; Ann. d. Phys. 2, 447, 1900; B. Walter, Ann. d. Phys. 17, 367, 1905).

3. Elementare Lichtemission im Serienspektrum. Sowohl in der negativen Glimmschicht des Glimmstromes wie in der positiven Lichtsäule niedriger Temperatur beobachtet man für eine Reihe von Elementen die Emission von Serienlinien. Alle Erfahrungen hierüber haben sich im Einklang mit der Hypothese (J. Stark, Die Elektrizität in Gasen S. 443) erwiesen, daß in diesem Falle der Strahlungserreger der Stoß mehr oder minder schneller negativer Elektronen (Kathodenstrahlen) ist. Insofern die Serienlinien positive Atomionen als Träger haben, ist zu folgern, daß die Kathodenstrahlen bei der Erregung der Serienemission neutrale Atome ionisieren und die entstehenden positiven Atomionen mit Schwingungsenergie in Serienfrequenzen gefüllt zurücklassen; auch kommt zweifellos der Fall vor, daß Kathodenstrahlen auf bereits vorhandene positive Atomionen stoßen und sie zu Lichtemission in ihren Serienfrequenzen veranlassen.

Beobachtet man die Serienemission durch die schnellen Kathodenstrahlen in der negativen Glimmschicht in der Weise, daß die Kathodenstrahlen in der Sehlinie heran- oder weglaufen, so zeigt sich in keinem Falle eine andere Lage der Serienlinie, als wenn man die Sehlinie senkrecht zum Kathodenstrahlbündel stellt, oder mit anderen Worten, es tritt bei der Erregung der Serienemission durch den Stoß von Kathodenstrahlen kein Doppler-Effekt auf. Dies erklärt sich daraus, daß infolge der kleinen Masse des stoßenden Elektrons auf die sehr viel größere Atommasse keine merkliche Bewegungsgröße übergeht und die Schwingungszentra der Serienlinien eine Beschleunigung erfahren, während die übrige Atommasse angenähert ruhig liegen bleibt (J. Stark, Die Elektrizität in Gasen S. 447).

Die relativ langsamen Kathodenstrahlen in der positiven Säule bringen bei kleiner Stromdichte (niedriger Temperatur) die zwei- und dreiwertigen Serienlinien (Funkenlinien), wenn überhaupt, so im allgemeinen in viel kleinerer Intensität zur Emission als die einwertigen Linien (Bogenlinien). Nehmen sie dagegen infolge größerer Stromdichte unter beträchtlicher Steigerung der Temperatur größere Geschwindigkeiten an, dann werden durch ihren Stoß auch die zwei- und dreiwertigen Linien in der positiven Säule intensiv erregt. Die schnellen Kathodenstrahlen der negativen Glimmschicht bringen neben den einwertigen auch die zwei- und dreiwertigen Linien in beträchtlicher, unter Umständen größerer Intensität zur Emission, z. B. im Falle des Sauerstoffs und Stickstoffs. Diese Verhältnisse erklären sich ungezwungen daraus, daß die Schaffung zwei- und dreiwertiger Ionen durch Stoß eine größere Kathodenstrahlenergie beansprucht als die Schaffung einwertiger Atomionen (J. Stark, Phys. Ztschr. 14, 102, 1913).

Die Emission von Serienlinien wird auch an einem Kanalstrahlenbündel beobachtet, sie hat ihren Ursprung in drei verschiedenen elementaren Vorgängen. Laufen die Kanalstrahlen auf den Beobachter in der Sehlinie zu, so erscheinen erstens an dem Ort, wo sie durch die positive Säule und die negative Glimmschicht geliefert werden, die Serienlinien („ruhende Linien“, „ruhende Intensität“), zweitens auf ihrer kurzwelligen Seite, von ihnen durch ein Intensitätsminimum getrennt, verbreiterte Streifen (Stark-Doppler-Effekt, „bewegte Streifen“, „bewegte Intensität“). Laufen die Kanalstrahlen vom Beobachter fort, so erscheinen die bewegten Streifen auf der langwelligen Seite der ruhenden Linie; verlaufen die Kanalstrahlen senkrecht zur Sehlinie, so tritt der Doppler-Effekt nicht auf (J. Stark, Phys. Ztschr. 6, 892, 1905; Ann. d. Phys. 21, 401, 1906; G. S. Fulcher, Bibliographie des Stark-Doppler-Effekts, Jahrb. d. Rad. u. El. 10, 82, 1913).

Die bewegte Intensität der Serienlinien in den Kanalstrahlen kommt, wie J. Stark (Phys. Ztschr. 8, 80, 913, 1907) vermutete, H. Wilsar (Phys. Ztschr. 12,

1091, 1911) und G. S. Fulcher (Phys. Ztschr. 13, 224, 1912) bestätigten, dadurch zustande, daß die positiven Strahlen durch ihren Zusammenstoß mit Gasteilchen auf ihrem Wege oszillatorische Energie in ihren Serienfrequenzen aus ihrer kinetischen Energie schaffen und darnach ausstrahlen. Läßt man nämlich die Kanalstrahlen eines ersten Gases in einem zweiten Gas verlaufen, so erhält man nur die bewegte Intensität der Serienlinien des ersten Gases an den Kanalstrahlen.

Wie insbesondere für den Wasserstoff außer Zweifel gestellt wurde, vermag die bewegte Intensität erst oberhalb eines bestimmten Schwellenwertes der Geschwindigkeit der Kanalstrahlen aufzutreten. Dieser Schwellenwert ist für größere Wellenlängen einer und derselben Serie kleiner als für kleinere Wellenlängen; er ist umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Wellenlänge. Dieses Auftreten eines Schwellenwertes läßt sich mit der Planckschen Lichtquantenhypothese in Zusammenhang bringen (J. Stark, Phys. Ztschr. 7, 251, 1906; 8, 913, 1907; 9, 767, 1908; 13, 532, 1912).; T. Royds, Phil. Mag. 18, 895, 1909).

Kommen in den Kanalstrahlen neben einwertigen auch noch zwei- oder gar dreiwertige Atomionen vor, so zeigt die bewegte Intensität der zwei- und unter Umständen auch diejenige der einwertigen Linien zwei Maxima. Diese Erscheinung läßt sich zwanglos aus dem Gleichgewicht zwischen folgenden Vorgängen erklären: Verwandlung drei- bezw. zweiwertiger Atomionen in zwei- bezw. einwertige durch Anlagerung negativer Elektronen, Verwandlung ein- bezw. zweiwertiger Ionen in zwei- bezw. dreiwertige durch Stoßionisierung; es können nämlich die Ionen, indem sie den Kathodenfall mit einem positiven Ladungsquantum, mit zwei oder drei durchlaufen, in dem „ein-, zwei- oder dreiwertigen Intervall" Geschwindigkeit annehmen und dann auf ihrem Weg hinter der Kathode in Ionen anderer Wertigkeit übergehen. Diese Erscheinungen wurden zuerst für den Fall des Heliums eingehend studiert (J. Stark, A. Fischer und H. Kirschbaum, Ann. d. Phys. 40, 499, 1913) und dann bei einer Reihe anderer Elemente (Al, Hg, O, S, N, Ar, Cl, C, B) wieder gefunden (J. Stark, G. Wendt, R. Künzer, H. Kirschbaum, Ann. d. Phys. 1913).

Die Emission der ruhenden Serienlinien in den Kanalstrahlen kommt dadurch zustande, daß durch den Stoß der Kanalstrahlen ein neutrales Atom durch Ionisierung in ein positives Ion verwandelt und gleichzeitig zur Emission ruhender Serienlinien veranlaßt wird. Es sind in diesem Falle zwei extreme Fälle ins Auge zu fassen. Erstens — dies ist der gewöhnliche Fall — kann das stoßende Kanalstrahlenteilchen mit so großer Geschwindigkeit die für Ionisierung empfindliche Stelle des gestoßenen Atoms treffen, und so rasch wieder verlassen, daß der größere Teil der Masse des gestoßenen Atoms ruhig liegen bleibt, wie bei dem Stoß eines Kathodenstrahls. In diesem Fall wird dann die von dem gestoßenen Atom emittierte Serienlinie relativ zur Achse der Kanalstrahlen ebensowenig einen Doppler-Effekt zeigen, wie im Fall des Stoßes der Kathodenstrahlen. Es ist aber zweitens auch mit der Möglichkeit zu rechnen und, daß bei größerer Masse und kleinerer Geschwindigkeit des Kanalstrahlenteilchens durch den Stoß die ganze Masse des gestoßenen Atoms in Mitleidenschaft gezogen wird und unter gleichzeitiger Ionisierung und Lichterregung von Seite des stoßenden Kanalstrahls in dessen Geschwindigkeitsachse Bewegungsgröße übernimmt und danach unter Lichtemission mit mehr oder minder großer Geschwindigkeit weiterläuft. In diesem Falle wird die emittierte Serienlinie, wenn die Kanalstrahlen in der Sehlinie auf den Beobachter zulaufen, bei kleiner Dispersion als ruhend oder kaum verbreitert erscheinen, bei großer Dispersion wird sie indes nach der kurzwelligen Seite zu verbreitert erscheinen. Die Intensität in dieser einseitigen Verbreiterung ist eine bewegte Intensität neuer Art; ihr Träger besitzt zwar ebenfalls Geschwindigkeit, indes entstammt Lichtenergie nicht der kinetischen Energie des eigenen Trägers, sondern derjenigen des stoßenden Kanalstrahlenteilchens. Zum Zweck der Unterscheidung mag man diejenige bewegte Intensität von Serienlinien, welche an den Kanalstrahlen selbst durch Stoß aus ihrer eigenen Energie erzeugt wird, „selbstbewegt", die neue Art von Intensität, welche an einem durch Stoß bewegten Atomion aus der fremder kinetischer Energie geschaffen wird, „fremdbewegt" nennen. Es sind erst in neuester Zeit an Linien von Aluminium Beobachtungen gemacht worden, welche sich in vorstehendem Sinne einer fremdbewegten Intensität deuten lassen (J. Stark, Ann. d. Phys., 1913).

Außer der Erregung ruhender Serienlinien in einem von Kanalstrahlen durchlaufenen Gas kennen wir noch einen anderen Fall, in welchem ruhende Serienlinien durch den Stoß von Kanalstrahlen zur Emission gebracht werden. Fallen nämlich Kanalstrahlen auf die festen Salze gewisser Metalle, vor allem der Alkalien und alkalischen Erden, so erscheinen in der unmittelbar an ihnen liegenden Gasschicht von 0,1 bis 5 mm Dicke die ruhenden Serienlinien des Metalls. Zwei Erscheinungen sind hierbei bemerkenswert. Erstens wird nämlich diese Serienemission

erst oberhalb eines gewissen Schwellenwertes der kinetischen Energie der Kanalstrahlen merkbar; dieser Schwellenwert ist für verschiedene Elemente verschieden groß. Zweitens tritt diese Serienemission nicht auf, wenn die Metallverbindung im Sichtbaren Licht absorbiert oder mit einer sehr dünnen absorbierenden Haut überzogen ist (J. Stark, und G. Wendt, Ann. d. Phys. 38, 679, 1912). Die wahrscheinliche Deutung dieser Erscheinungen ist folgende. Durch den Stoß der einzelnen Kanalstrahlenteilchen werden mittelbar oder unmittelbar Atome neutral oder auch ionisiert aus der festen Oberfläche herausgeworfen. Oberhalb eines gewissen Schwellenwertes der stoßenden kinetischen Energie werden die Atomionen bei der Abtrennung gleichzeitig zu Lichtschwingungen angeregt und strahlen ihre oszillatorische Energie dann im Gasraum aus, wenn sie ihnen nicht von Seite absorbierender Teilchen in der Oberfläche bei ihrem Austritt aus dieser abgenommen wird.

Literatur. *Vgl. die im Text zitierten Arbeiten.*

J. Stark.

Strahlungsmessung.

1. Strahlung. 2. Apparate zur Messung von Gesamtstrahlung: a) Thermoelement. b) Bolometer. c) Andere Apparate. 3. Messung der Gesamtstrahlung: a) Relative Messung. b) Quantitative Messung. c) Pyrometrie. d) Sonnenstrahlung. 4. Messung spektral zerlegter Strahlung. a) Apparate. b) Pyrometrie. c) Sonnenstrahlung.

1. Strahlung. Jeder Körper höherer Temperatur sendet Lichtstrahlen und die früher sogenannten Wärmestrahlen aus, welche von der Temperatur und der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers abhängig sind. Physikalisch betrachtet sind Licht- und Wärmestrahlen identisch, und es ist nur durch die zufällige Konstruktion des menschlichen Auges bedingt, daß die Wärmestrahlen nicht gesehen werden können. Der Ausdruck Wärmestrahlen ist daher zu verwerfen und besser durch ultrarote Strahlen zu ersetzen, da sämtliche Strahlen die Eigenschaft besitzen, den bestrahlten Körper zu erwärmen. Die Gesamtstrahlung umfaßt daher:

1. die dunklen ultravioletten Strahlen von der Wellenlänge $\lambda = 0{,}1$ bis $0{,}4\ \mu$, also 2 Oktaven;

2. die sichtbaren Strahlen oder Lichtstrahlen von $\lambda = 0{,}4$ bis $0{,}76\ \mu$, also ungefähr 1 Oktave.

3. die dunklen ultraroten Strahlen von $\lambda = 0{,}76$ bis ungefähr $100\ \mu$, also ungefähr 7 Oktaven.

Hiervon sind durch ein unerforschtes Gebiet getrennt die von Hertz entdeckten elektrischen Strahlen von $\lambda = 3$ mm bis zum Betrage von Kilometern. Diese Strahlen sind aber nach ihrer Erregungsart nicht zur Temperaturstrahlung zu rechnen.

Sinkt die Temperatur des glühenden Körpers, so hört allmählich die Lichtstrahlung auf, und es bleibt nur die ultrarote Strahlung übrig. Der Körper strahlt, solange seine Temperatur nicht — 273° C, d. h. den Nullpunkt der absoluten Temperaturskala erreicht hat.

Es sei hervorgehoben, daß nicht nur der heißere Körper zum kälteren strahlt, sondern auch umgekehrt der kältere zum heißeren. Sogar Körper gleicher Temperatur senden sich gegenseitig Strahlen zu, wobei das Temperaturgleichgewicht in einem gleich temperierten, allseitig abgeschlossenen Raum dadurch aufrecht erhalten wird, daß sich die Körper gegenseitig gleich viel Strahlung zusenden, wenn man die verschiedenen Absorptions- und Emissionsvermögen berücksichtigt.

Die von dem Körper ausgehende Strahlung kann nicht direkt quantitativ gemessen werden, sondern muß sich erst in eine andere Energieform, in körperliche Wärme, d. h. in eine Wärmemenge umwandeln. Dies geschieht dadurch, daß man einen absorbierenden Körper in den Strahlengang stellt. Die Absorption ist im allgemeinen keine vollständige, sondern die Strahlung wird zum Teil reflektiert. Ist die Absorption vollständig, so nennt man den Körper schwarz, wobei der Fall eintreten kann, daß der Körper wohl für die sichtbaren, aber nicht für die ultraroten Strahlen schwarz ist, oder umgekehrt.

Durch die Absorption erfährt der bestrahlte Körper eine Temperaturerhöhung, welche ein Maß für die Intensität der Strahlung gibt.

2. Apparate zur Messung von Gesamtstrahlung. Sehr intensive Strahlung, z. B. diejenige der Sonne oder eines sehr heißen Körpers kann direkt mit der Hand oder mit Hilfe eines gewöhnlichen Thermometers, dessen Kugel geschwärzt ist, wahrgenommen werden.

2a) Thermoelement. Bei der relativ großen Masse des Thermometers ist die Temperaturerhöhung bei gegebener schwacher Strahlung zunächst sehr klein, aber ein Thermoelement von geringerer Masse erfährt sofort eine viel größere Temperaturerhöhung. Ein Thermoelement besteht aus zwei Drähten verschiedenen Materials, welche an den Enden zusammengelötet oder geschweißt sind.

Wird eine der beiden Lötstellen erwärmt, so fließt ein Strom durch das Thermoelement. Wird die andere Lötstelle erwärmt, so fließt

ein entgegengesetzt gerichteter Strom durch das Thermoelement. Ein solcher Strom kann durch ein Galvanometer geleitet werden, wo er einen Magneten nebst Spiegel und Lichtzeiger dreht. Die Größe des Ausschlages dieses Lichtzeigers, welche an einer Skala gemessen oder nach der Poggendorffschen Methode mit dem Fernrohr beobachtet werden kann, gibt ein genaues relatives Maß für die Intensität der Strahlung.

Drahtkombinationen für besonders empfindliche Thermoelemente sind z. B. Wismut-Antimon, Kupfer-Konstantan oder Eisen-Konstantan. Statt eines Thermoelements pflegt man mehrere hintereinander geschaltete Thermoelemente, eine Thermosäule, z. B. von Melloni, zu benutzen und alle Lötstellen, welche gleich gerichtete Ströme liefern, zu bestrahlen.

Da Drähte von 0,1 mm und sogar von 0,01 mm Dicke[1]) verwandt werden können, so leuchtet ein, daß die Wärmekapazität der Lötstellen sehr klein und demnach die Temperaturerhöhung sehr groß gemacht werden kann. Um möglichst alle auf die Lötstellen fallenden Strahlen zu absorbieren, pflegt man die Lötstellen mit Ruß oder elektrisch niedergeschlagenem Platinschwarz zu überziehen.

Die nebenstehende Figur 1 zeigt eine Thermosäule in der Form, welche ihr Rubens gegeben hat. Auf dem Elfenbeinrahmen F sind die Thermoelemente aus Eisenkonstantandrähten, welche mit Silber zusammengelötet sind, aufgewickelt. Die Lötstellen sind zu kreisförmigen Scheibchen ausgehämmert, die mittelste Reihe sind die gleichnamigen Lötstellen, welche gemeinsam bestrahlt werden. Diese Lötstellen haben zugleich eine lineare Anordnung, so daß die Thermosäule bei spektraler Zerlegung der Strahlung verwandt werden kann, während bei Untersuchung von Gesamtstrahlung die Strahlung durch einen vor die Thermosäule gesetzten, gut reflektierenden Trichter auf die Lötstellen konzentriert wird.

2b) Bolometer. Ein anderer für Strahlungsmessungen geeigneter Apparat ist das von Langley zuerst konstruierte Bolometer. Ein Draht oder ein schmaler, dünner Blechstreifen, z. B. aus Platin, vergrößert mit steigender Temperatur, also auch unter dem Einfluß von Bestrahlung, seinen elektrischen Widerstand. Diese Widerstandsänderung kann elektrisch z. B. in der Wheatstoneschen Brücke gemessen oder durch den Ausschlag eines Lichtzeigers sichtbar gemacht werden. Die Größe dieses Ausschlages gibt wieder ein relatives Maß für die Intensität der Strahlung. Solchen Blechwiderständen kann nach der Wollastonschen Methode die Dicke von 0,001 mm gegeben werden. Damit der elektrische Widerstand genügend

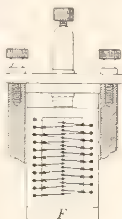
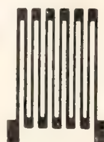
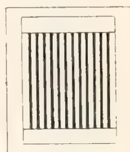


Fig. 1.


Fig. 2.

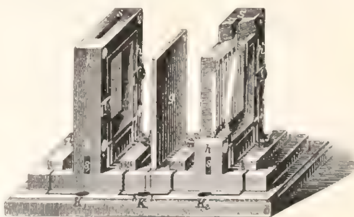

Fig. 3.

groß wird, nimmt man lange, schmale Bleche, die nebeneinander auf Isolationsmaterial, z. B. Schiefer, montiert und geschwärzt werden.

Solchen elektrischen Widerstand nebst der zur Widerstandsänderung gehörigen Meßvorrichtung nennt man Bolometer (βόλος der Pfeil, Strahl), den Widerstand selbst, einen Bolometerzweig. Figur 2 bis 4 zeigt solche Bolometerzweige nach der Konstruktion von Lummer und Kurlbaum.

Es ist klar, daß ein solches Bolometer zugleich ein sehr empfindliches Thermometer ist, d. h. der Lichtzeiger würde in einem gewöhnlichen Beobachtungsraum wegen der Temperaturschwankungen stets wandern. Deshalb müssen innerhalb der 4 Zweige der Wheatstoneschen Brücke mindestens 2 Zweige als Bolometerzweige eingerichtet sein, welche sich in derselben Weise das Gleichgewicht halten, wie die beiden Lötstellen eines Thermoelements.

Figur 4 zeigt die Anordnung von 4 möglichst gleichen Bolometerzweigen in einem


Fig. 4.

[1]) So dünne Drähte können nach der Wollastonschen Methode hergestellt werden, welche darin besteht, daß ein dicker Silberdraht eine Seele von einem dünnen Platindraht erhält. Der Silberdraht läßt sich sehr fein ausziehen, worauf das Silber mit Salpetersäure abgeätzt wird, und der sehr dünne Platindraht übrig bleibt.

Hartgummigestell. Je 2 Zweige sind so hintereinander gestellt, daß der hintere Zweig die in den Zwischenräumen des vorderen Zweiges durchgelassene Strahlung empfängt, sie werden also gleichzeitig bestrahlt. Die beiden anderen Zweige sind durch den Schirm g vor Strahlung geschützt, da sie nach ihrer besonderen Schaltung in der Wheatstoneschen Brücke einen entgegengesetzten Ausschlag hervorrufen würden.

Thermoelement und Bolometer ergeben ungefähr die gleiche Strahlungsempfindlichkeit. Der Vorzug des Thermoelements besteht in der einfacheren Apparatur und der größeren Handlichkeit, der Vorzug des Bolometers in der Möglichkeit, die auffallende Strahlung direkt in elektrischen Größen oder in Wärmeeinheiten auszuwerten, d. h. ihrem quantitativen Betrage nach zu messen.

2c) Andere Apparate. Auch die alte Crookessche Lichtmühle läßt sich zu Strahlungsmessungen benutzen, wenn man die starke Reibung, welche zwischen Spitze und Träger der geschwärzten Flügel besteht, durch Aufhängen der Flügel an einem dünnen Quarzfaden vermeidet. Statt der vier Flügel wählt man dann nur zwei. Bei Bestrahlung eines Flügels halten sich dann zwei Kräfte das Gleichgewicht, einerseits die Verstärkung der Stoßkraft der an die erwärmte Fläche stoßenden Gasmolekel und die geringe Torsionskraft des Quarzfadens. An dem Gestänge der Flügel ist zugleich ein Spiegel befestigt, dessen Drehung einen Lichtzeiger bewegt. Ein solcher Apparat, der bis auf etwa 0,003 mm Quecksilber evakuiert sein muß, ist das Radiometer von Nichols.

Das Radiomikrometer von Boys (Fig. 5) benutzt ein ringförmiges Thermoelement Th, welches an einem Quarzfaden in einem Magnetfeld NS hängt. Wird die eine geschwärzte Lötstelle bestrahlt, so geht ein Strom durch das Thermoelement, welches nach der Linkenhandregel eine Drehung ausführt. Der Spiegel s dreht sich mit und bewegt einen Lichtzeiger.

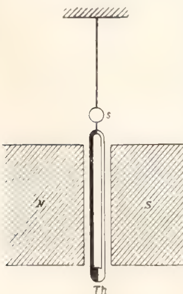


Fig. 5.

3. Messung der Gesamtstrahlung.

Mit diesen Apparaten können nun Strahlungsmessungen vorgenommen werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß das Radiometer von Nichols, welches wegen des ziemlich hohen Vakuums eine Verschlußplatte trägt, nicht die gesamte ankommende Strahlung mißt, sondern nur den von der Verschlußplatte durchgelassenen Teil. Allerdings wird ein Teil der Strahlung, z. B. der langwelligen, schon auf seinem Wege durch die Luft wegen des vorhandenen Kohlendioxyds und Wasserdampfes merklich absorbiert.

3a) Relative Messung. Zunächst handelt es sich um die relative Messung der gesamten, von einem Körper ausgehenden Strahlung, die ein erhebliches Wellenlängenbereich umfassen kann. Diese Gesamtstrahlung ist bei gleicher Temperatur sehr stark von der Oberflächenbeschaffenheit des strahlenden Körpers abhängig. Metallisch blanke, d. h. gut reflektierende, also wenig absorbierende Körper strahlen wenig aus, während schwarze Körper, d. h. schlecht reflektierende, also viel absorbierende Körper, viel ausstrahlen. Diese Tatsachen sind in dem Kirchhoffschen Satz vom Emissions- und Absorptionsvermögen zusammengefaßt, $E/A = C$, d. h. das Verhältnis vom Emissionsvermögen zum Absorptionsvermögen ist konstant. Dieser Satz kann leicht durch Messungen geprüft werden, indem man verschiedene Körper, z. B. blankes Platin und Platinschwarz, einmal emittieren, das andere Mal absorbieren läßt.

Hierbei ist aber zu betonen, daß der Kirchhoffsche Satz sich jedesmal nur auf ein bestimmtes enges Wellenlängenintervall bei bestimmter Temperatur bezieht. Es kann sehr wohl sein, daß ein Körper in einem Wellenlängengebiet schwarz ist, in einem anderen nicht. So ist z. B. das gewöhnliche durchsichtige Glas für ein gewisses Gebiet langer Wellen nahezu schwarz.

Die Strahlung ist auch in sehr hohem Grade von der Temperatur abhängig, es ist also derselbe Körper bei verschiedenen Temperaturen zu untersuchen. Hierbei zeigt sich, daß die Strahlung beliebiger Körper im allgemeinen nicht einem einfachen Gesetz folgt, während die Strahlung eines einzigen Körpers, nämlich des sogenannten theoretisch schwarzen Körpers einem sehr einfachen Gesetz, nämlich dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz folgt. Die Gesamtstrahlung S ist proportional ϑ^4, wobei ϑ die absolute Temperatur, d. h. vom absoluten Nullpunkt -273^0 C aus gemessen darstellt. Die absolute Temperatur ϑ ist daher $= t + 273^0$, wenn t die Temperatur in Celsiusgraden darstellt. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß, wie erwähnt, der strahlende Körper nicht allein strahlt, sondern daß auch der Strahlung empfangende Körper, z. B. der Bolometerzweig, strahlt, und zwar auch proportional der vierten Potenz seiner absoluten Temperatur. Infolgedessen ist die vom Bolometer empfangene und gemessene Strahlung S

proportional $\vartheta_1^4 - \vartheta_2^4$, wenn ϑ_1 die Temperatur des strahlenden Körpers und ϑ_2 die Temperatur des Bolometers bedeutet.

3b) Quantitative Messung. Bisher haben wir uns damit begnügt, relative Messungen auszuführen, indem wir die Strahlung dem Ausschlage des Lichtzeigers proportional setzten. Es interessiert aber auch die Frage nach der quantitativen Größe oder dem absoluten Betrage der Strahlung. Die Strahlung als solche können wir allerdings nicht messen, wohl aber die dem bestrahlten Körper zugeführte Wärmemenge und zwar in Grammkalorien pro Sekunde oder in elektrischen Größen, z. B. in Watt. Hierzu bietet das Bolometer einen direkten Weg dar. Da ein Bolometerzweig seiner Natur nach ein elektrischer Widerstand w ist, so kann derselbe von einem Strom i durchflossen und in dem Widerstand eine Wärmemenge Q erzeugt werden, welche Joulesche Wärme genannt wird und gleich $Q = i^2 w t C$ ist, worin t die Zeit des Stromdurchgangs und C eine Konstante gleich $0{,}239 \frac{g \cdot cal}{sec}$ ist. Es ist nun immer möglich, durch Variieren der Stromstärke eine Wärmemenge zu erzeugen, welche der durch eine Strahlung zugeführten Wärmemenge gleich ist. Das Kriterium für die Gleichheit der erzeugten Wärmemengen ist die Gleichheit der Ausschläge des Lichtzeigers, woraus dann die Größe der Strahlung in Grammkalorien folgt. Da $i^2 . w = e . i$, also gleich Spannung mal Stromstärke ist, so ist die Strahlung auch direkt in Watt als elektrische Größe oder auch als Arbeit pro Zeiteinheit angebbar. Es interessiert aber nicht, was ein beliebig großer Körper zu einem beliebig großen Bolometer strahlt, sondern was die Flächeneinheit des Körpers in den Raum, in diesem Falle, was die ebene Fläche in den Raum einer Halbkugel ausstrahlt. Zu dem Zweck wählt man nicht einen strahlenden Körper von ausgemessenen Dimensionen, sondern man stellt vor den Körper ein Diaphragma, z. B. einen Metallschirm mit kreisrunder Oeffnung, deren Fläche leicht zu messen ist. Dann wirkt das Diaphragma so, als wäre die Oeffnung mit der Masse des strahlenden Körpers belegt, vorausgesetzt, daß von allen Teilen des Bolometerzweiges aus gesehen die Oeffnung durch den Körper ausgefüllt erscheint.

Die Oeffnung ist also zugleich der Ort des strahlenden Körpers, von wo aus der Abstand des Bolometerzweiges zu messen ist. Steht die Verbindungslinie der Lochmitte und Mitte des Bolometerzweiges senkrecht auf beiden Flächen, so verhält sich die gesamte vom Diaphragma aus senkrecht bestrahlte Fläche zur Bolometerfläche wie $F_1 : F_2$, worin F_1 die Oberfläche der mit dem Bolometerabstand r als Radius konstruierten Halbkugeloberfläche und F_2 die Fläche des Bolometerzweiges bedeutet. Da für die vom Diaphragma ausgehende Strahlung aber das Lambertsche Kosinusgesetz gilt, so haben wir jedes Flächenelement der Halbkugeloberfläche mit dem Kosinus des Austrittswinkels der Strahlung zu multiplizieren. Dadurch wird aus der Halbkugeloberfläche die größte Kugelkreisfläche. Die gesamte durch das Diaphragma gehende Strahlung verhält sich also zu der vom Bolometer gemessenen wie $\pi r^2 : F_2$. Hiernach sind wir also in der Lage, die Gesamtstrahlung der Flächeneinheit eines Körpers messen zu können.

Aus der Proportionalität innerhalb des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes wird durch Multiplikation mit einer Konstanten σ eine Gleichung: $S = \sigma (\vartheta_1^4 - \vartheta_2^4)$.

Setzen wir $\vartheta_1 = 1$, und $\vartheta_2 = 0$, so wird $S = \sigma$, d. h. unsere willkürliche Konstante σ, ist diejenige Strahlung, welche die Flächeneinheit eines schwarzen Körpers von der absoluten Temperatur 1° zu einem Bolometerzweig von der absoluten Temperatur 0° sendet. Diese Konstante kann nun nach der obigen Methode, die von Kurlbaum angegeben ist, bestimmt werden, indem man die Strahlung eines schwarzen Körpers beliebiger Temperatur ϑ_1, zu einem Bolometer von Zimmertemperatur ϑ_2, gelangen läßt.

Angström hat eine ähnliche Methode angegeben, nach welcher die Temperaturgleichheit des bestrahlten oder elektrisch geheizten dünnen Bleches mit Hilfe eines hinter dem Bleche isoliert befestigten Thermoelements bestimmt wird.

Figur 6 zeigt in den Punkten L, L die Lötstellen des Thermoelements, welche hinter zwei vollkommen gleichen abwechselnd zu bestrahlenden dünnen und schmalen Platinstreifen liegen. Figur 7 zeigt die Montierung dieses Apparats, welcher speziell für die Messung der Sonnenstrahlung bestimmt war und deshalb von Angström „elektrisches Kompensationspyrheliometer" genannt wurde.

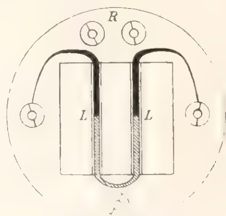


Fig. 6.

Ein ganz anderer Weg besteht darin, nicht diejenige Strahlung resp. Wärmemenge zu messen, welche der bestrahlte Körper empfängt, sondern diejenige Wärme-

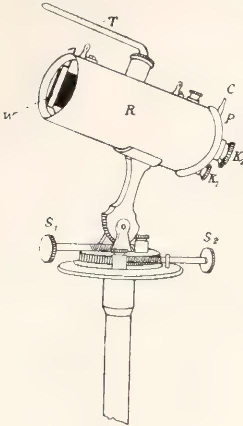


Fig. 7

menge, welche der strahlende Körper verliert. Im Prinzip wäre hierzu z. B. ein strahlendes Quecksilberthermometer mit großem kugelförmigem geschwärztem Gefäß geeignet, wobei es selbst die Temperatur des strahlenden Körpers angibt. Aus der zu messenden Oberfläche und der Wärmekapazität der Thermometerkugel ergibt sich zunächst der Wärmeverlust pro Flächeneinheit. Dieser Verlust ist aber nicht nur durch Ausstrahlung, sondern auch durch die Abgabe der Wärme an die Luft, durch Leitung und Konvektion, bedingt. Diese Abgabe muß also entweder besonders bestimmt oder vermieden werden, z. B. dadurch, daß man den strahlenden Körper in ein Vakuum setzt, dessen Wände auf konstanter Temperatur gehalten werden.

Die durch Luftleitung und Konvektion abgeführte Wärmemenge Q kann auch besonders bestimmt werden. Sei S_1 die Strahlung des betreffenden schwarzen Körpers, S_2 die Strahlung eines blanken, aber sonst völlig identischen Körpers, dann sind Q, S_1 und S_2 zunächst unbekannt. Es kann aber gemessen werden:

1. $Q + S_1 = a$, 2. $Q + S_2 = b$, 3. $S_1/S_2 = n$, letzteres nach irgendeiner relativen Methode. Dann können aus den 3 Gleichungen alle drei Unbekannten, also auch S_1, die Strahlung des schwarzen Körpers, berechnet werden.

Statt des Thermometergefäßes nimmt man als strahlenden Körper besser einen Körper mit eingebautem Widerstand, der elektrisch geheizt und auf konstanter Temperatur gehalten wird, während die bestrahlte Oberfläche des Hohlraums durch Wasserkühlung gleichfalls auf konstanter Temperatur bleibt.

Figur 8 zeigt eine Versuchsanordnung von

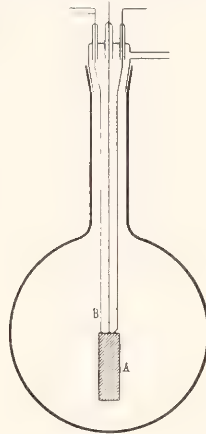


Fig. 8.

Westphal. Der elektrisch geheizte Körper A, dessen Temperatur mit dem Thermoelement B gemessen wird, strahlt gegen die innere Oberfläche einer geschwärzten Hohlkugel, deren Temperatur diejenige des Wasserbades ist.

Nach den beschriebenen Methoden kann die Konstante des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes bestimmt werden. Sie ist in den letzten Jahren vielfach gemessen, ihr wahrscheinlicher Wert ist:

$$\sigma = 5{,}5 . 10^{-12}\ \text{Watt/cm}^2 = 1{,}3 . 10^{-12}\ \frac{\text{g kal}}{\text{cm}^2\text{sek}}$$

3c) Pyrometrie. Sobald σ bekannt ist, kann man das Gesetz: $S = \sigma(\vartheta_1^4 - \vartheta_2^4)$ zur Bestimmung der unbekannten Temperatur ϑ_1 eines strahlenden Körpers benutzen, da alle anderen Größen der Messung zugänglich sind. Hierbei ist zu beachten, daß die Gleichung nur für schwarze Körper gilt. Ist aber der Körper als allseitig geschlossener, gleichmäßig glühender Hohlraum gegeben, wie es in der Technik, z. B. bei Porzellanöfen vorkommt, so ergibt die Strahlungsmessung die wahre Temperatur. Sollte der strahlende Körper nicht schwarz sein, so sagt die Messung nur aus, der Körper sendet

eine Strahlung aus, welche gleich der Strahlung eines schwarzen Körpers von der Temperatur ϑ_1 ist. Diese Temperatur ϑ_1 wird dann die schwarze Temperatur des Körpers genannt. Für die Technik genügt häufig diese Angabe der schwarzen Temperatur, da es hier nur auf das Festhalten und die Wiederherstellung einer bestimmten Temperatur ankommt. Bequemer und genauer sind die später zu besprechenden Methoden der spektralen Zerlegung der Strahlung.

3d) Sonnenstrahlung. Ein besonderes Interesse hat diejenige Strahlungsmenge, welche die Sonne zur Erde sendet, da hierin die für alles Lebendige auf Erden notwendige Energie geliefert wird. Es ist nun leicht, diejenige Strahlungsmenge zu messen, welche momentan zu einem bestimmten Punkt der Erdoberfläche gelangt. Diese wechselt aber stark, je nach dem Wassergehalt und der Dicke der durchstrahlten Luftschicht. Als konstant ist dagegen diejenige Strahlungsmenge zu betrachten, die zur oberen Grenze der Erdatmosphäre gelangt. Die Strahlungsmenge, welche senkrecht auf die Erdoberfläche pro Quadratzentimeter in der Minute aufträfe, wenn keine Erdatmosphäre vorhanden wäre, wird Solarkonstante genannt und ist eine viel umstrittene Größe, da es sehr schwierig ist, die Absorption der Strahlung in der Atmosphäre zu bestimmen. Diese Strahlung umfaßt ein großes Wellenlängengebiet mit wechselndem Absorptionskoeffizienten.

Die für die Solarkonstante gefundenen Werte schwanken zwischen 2 und 3 Grammkalorien pro Quadratzentimeter und Minute, ein wahrscheinlicher Wert ist nach Pringsheim 2,2 g cal/cm²min.

Mit Hilfe dieser Zahl kann man berechnen, wieviel 1 cm² der Sonnenoberfläche pro Sekunde ausstrahlt. Diese Strahlung S, in das Stefan-Boltzmannsche Gesetz $S = \sigma(\vartheta_1^4 - \vartheta_2^4)$ eingesetzt, ergibt die unbekannte Temperatur der Sonne $\vartheta_1 = 6033^0$ abs., wobei ϑ_2^4 als gegen ϑ_1^4 verschwindend vernachlässigt werden kann, d. h. die zufällige Temperatur ϑ_2 der Erde ist hierbei gleichgültig. Bei dieser Betrachtung wird wieder vorausgesetzt, daß die Sonne wie ein schwarzer Körper strahlt. Diese Annahme scheint für die Sonne angenähert zuzutreffen.

4. Messung spektral zerlegter Strahlung. Bisher sind hier nur die Methoden zur Messung der von einem Körper ausgesandten Gesamtstrahlung besprochen worden. Es hat aber ein Interesse, diese Strahlung spektral zu zerlegen und die in den einzelnen Wellenlängengebieten vorhandene Strahlung, d. h. die Energieverteilung im Spektrum zu messen.

4a) Apparate. Die Mittel zur spektralen Zerlegung sind die in der Optik, also im sichtbaren Gebiet üblichen, d. h. Prismen und Gitter, Linsen und Hohlspiegel. Hierbei ist aber zu berücksichtigen, daß die dunkle Strahlung, je mehr man zu langen Wellen übergeht, vom Glase absorbiert wird. Es müssen daher die Glasprismen, je nach dem Spektralgebiet durch Quarz, Steinsalz, Flußspat usw. ersetzt werden, während die Glaslinsen durch Kombination zweier solcher Medien z. B. als Quarzflußspatachromate hergestellt werden müssen. Die Benutzung solcher Linsen und Prismen setzt die genaue Kenntnis der Absorption der verschiedenen Wellenlängen voraus, da die Intensitätsverteilung im Spektrum gestört wird, und die entsprechende Korrektion an den Messungen angebracht werden muß. Deshalb ist es vorteilhafter, statt der Linsen gut polierte metallene Hohlspiegel anzubringen, deren Reflexionsvermögen im Gebiet langer Wellen fast vollkommen ist, während die Brennweite konstant bleibt.

Am gewöhnlichen Spektrometer sind daher die Linsen durch Hohlspiegel zu ersetzen, während das menschliche Auge und das Fernrohrokular durch den thermischen Apparat, Bolometer, Thermosäule oder dgl. ersetzt wird, dessen Platz der Brennpunkt der Strahlen, d. h. die Abbildung des Spaltes im monochromatischen Licht ist. Daher muß der thermische Apparat selbst die Gestalt des Spaltes annehmen, ein Bolometerzweig schmiegt sich dieser Gestalt als ein schmaler, dünner Blechstreifen oder als dünner Draht in fast idealer Weise an. Den mehr oder weniger punktförmigen Lötstellen der Thermosäule ist eine lineare Anordnung zu geben, wie es Rubens bei Konstruktion einer sehr empfindlichen Thermosäule getan hat. Mit Hilfe eines solchen thermischen linearen Gebildes kann dann das spektrale Band einer Strahlungsquelle abgetastet und die Intensität an den verschiedenen Stellen des Spektrums zunächst relativ gemessen werden.

Denken wir uns wie in Figur 9 horizontal die Wellenlängen in $\mu = 0{,}001$ mm als Einheit und vertikal die zugehörigen Intensitäten J in willkürlicher Einheit aufgetragen, so erhalten wir für verschiedene Temperaturen nebenstehende Kurven, welche Isothermen genannt werden, da bei jedem einzelnen Versuch die Temperatur konstant gehalten und die Abhängigkeit der Intensität von der Wellenlänge gemessen wurde.

So einfach prinzipiell eine relative Messung der Intensität innerhalb eines gegebenen Spektrums ist, so schwierig ist es, die wahren Intensitätsverhältnisse einer Strahlungsquelle festzustellen. Das Prisma liefert infolge seiner Dispersion nicht ein Normalspek-

trum, sondern die Wellenlängenbezirke willkürlich auseinandergezogen oder zusammengedrängt. Dies beeinflußt die an der jedesmaligen Stelle gemessene Intensität ebenso

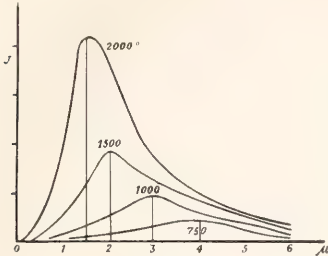


Fig. 9.

wie die Absorption des Prismas. Die gemessenen Intensitäten müssen also wegen Dispersion und Absorption korrigiert werden. Eine große Fehlerquelle liegt ferner in dem diffus über dem Spektrum gelagerten Licht. Ebenso ist wegen der Breite des Spaltes und des Bolometerstreifens auf unendlich schmale Breite zu reduzieren, um schließlich die wahren Intensitätsverhältnisse im Spektrum angeben zu können. Sind diese bekannt, so zeigt in Figur 9 das Flächenstück, welches von der Kurve und der Abszissenachse begrenzt ist, die Gesamtstrahlung an. Mit Hilfe des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes ist dann auch die Strahlung innerhalb eines schmalen Wellenlängenbezirkes ihrem quantitativen Betrage nach bekannt.

Die aus derartigen Versuchen und der Theorie von W. Wien und M. Planck abgeleiteten Strahlungsgesetze seien hier kurz erwähnt, da wir sie zu Temperaturmessungen benutzen wollen.

$$\text{Gl. 1)}\quad J_{\lambda,\vartheta} = S = \frac{c_1}{\lambda^5\left(e^{\frac{c_2}{\lambda\vartheta}} - 1\right)}$$

$$\text{Gl. 2)}\quad \lambda_{\text{max.}}\,\vartheta = C_1$$

$$\text{Gl. 3)}\quad J_{\text{max.}} = C_2\vartheta^5$$

$$\text{Gl. 4)}\quad \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} J.d\lambda = \sigma\vartheta^4$$

Gleichung 1 gibt das Energieverteilungsgesetz, $J_{\lambda\vartheta}d\lambda$ bedeutet die Intensität für ein enges Spektralgebiet von der Wellenlängenbreite $d\lambda$, da es nach der Figur das Produkt aus der Ordinate J und dem unendlich kleinen Stück $d\lambda$ der Abszissenachse ist. J hat den Index λ, ϑ, da es nur für eine bestimmte Wellenlänge und Temperatur gilt. Jede der Gleichungen gestattet, unter der Voraussetzung, daß der strahlende Körper schwarz ist, die Messung der unbekannten Temperatur ϑ. Die Messung ist jedoch umständlich, denn es wird einer der beschrieben thermischen Meßapparate vorausgesetzt, ferner muß die Messung entweder eine quantitative sein, oder sie muß auf einen Vergleichskörper bekannter Temperatur bezogen werden.

4b) Pyrometrie. Die Messungen gestalten sich einfacher, wenn wir kurze Wellenlängen betrachten, welche in das optische Gebiet fallen. Dann können wir wieder den thermischen Meßapparat durch einen optischen Meßapparat, z. B. durch ein Spektralphotometer ersetzen. Die einfachste Methode ist folgende: Aus Gleichung 1 folgt rein rechnerisch Gleichung 5:

$$\log\text{ nat}\frac{J_1}{J_2} = \frac{c}{\lambda}\left(\frac{1}{\vartheta_1} - \frac{1}{\vartheta_2}\right)$$

Danach können wir eine beliebig hohe, unbekannte Temperatur ϑ_1 messen, indem wir die zugehörige Strahlungsintensität J_1 und die zu einer bekannten Temperatur ϑ_2 gehörige Intensität J_2 messen, und zwar innerhalb eines eng begrenzten Wellenlängengebietes. Ein für solche Zwecke konstruierter Apparat heißt ein optisches Pyrometer. Ein Beispiel hierfür ist dasjenige von Wanner, welches im wesentlichen ein Königsches Spektralphotometer darstellt. Ein optisches Pyrometer kann, indem man stets von derselben Temperatur ausgeht, so geeicht werden, daß man unmittelbar ohne Rechnung die unbekannte höhere Temperatur an einer Skala abliest.

Ein sehr einfaches photometrisches Prinzip wird in dem optischen Pyrometer von Holborn und Kurlbaum benutzt, s. Figur 10.

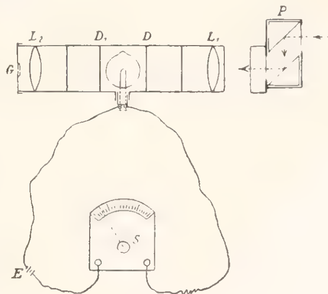


Fig. 10.

Als Photometer dient ein Fernrohr, dessen Objektivlinse L_1 hinter der Oeffnung des Diaphragmas D ein Bild der glühenden Fläche erzeugt, deren Temperatur zu messen

ist. Hinter dem Diaphragma befindet sich der Kohlebügel einer kleinen Glühlampe, die in der Figur um 90° gedreht dargestellt ist. Durch die Linse L_2 mit dem vorgesteckten roten Glase G, welches einen möglichst engen Spektralbezirk durchlassen soll, wird das Bild der leuchtenden Fläche betrachtet, von welcher sich der Kohlebügel zunächst schwarz abhebt.

Wird der Faden der Glühlampe durch den Strom erhitzt, und erreicht die Helligkeit seiner roten Strahlen diejenige der zu messenden Fläche, so verschwindet der Bügel vollständig, während sich seine durch Wärmeableitung gekühlten Schenkel noch von der leuchtenden Fläche abheben.

Diese photometrische Anordnung ist sehr empfindlich, weil sie die Bedingung erfüllt, daß die Grenzkanten der zu vergleichenden hellen Flächen vollkommen verschwinden. In der Tat ist man bei richtiger Einstellung nicht imstande, den Ort des Kohlebügels anzugeben. Es macht den Eindruck, als löse sich der Bügel in einer feurigen Flüssigkeit auf, während die kälteren Schenkel noch auf die Stelle hinwiesen, auf welche die Aufmerksamkeit zu lenken ist. Um die Stromstärke der Glühlampe stetig ändern zu können, bringt man in dem Kreise einen Regulierwiderstand W an, z. B. ein Konstantanband mit Gleitkontakt, außerdem ist ein Strommesser S nötig.

Hier wird also von der Gleichheit der Intensität des roten Lichtes auf die Gleichheit der Temperatur geschlossen. Es sei betont, daß die Entfernung des zu untersuchenden Körpers vom Fernrohr keinen Einfluß auf die Helligkeit des Bildes, sondern nur auf die Größe des Bildes ausübt. Ein solches Pyrometer wird geeicht, indem es auf einen schwarzen Körper bekannter Temperatur eingestellt und zugleich am Amperemeter die Stärke des Lampenstromes abgelesen wird. Danach gehört zu jeder Temperatur eine am Amperemeter angezeigte Stromstärke, so daß das Amperemeter statt der Stromstärkenskala direkt eine Temperaturskala erhalten kann. An der Temperaturskala kann dann die unbekannte Temperatur anderer schwarzer Körper, auf welche das optische Pyrometer eingestellt wird, abgelesen werden. Uebersteigt die zu messende Helligkeit diejenige der Glühlampe, so wird eine Lichtschwächung P vor dem Objektiv angebracht, welche aus zwei Prismen besteht, an deren Hypotenusenflächen zweimalige Reflexion stattfindet. Setzt man in Gleichung 5 für das Verhältnis der Intensitäten J_2/J_1 die Stärke der Lichtschwächung ein, so erhält man für jede Temperatur ϑ_2 der alten Temperaturskala eine neue Temperatur ϑ_1, welche die mit der Lichtschwächung gemessene Temperatur darstellt. Es kann also einfach eine neue für die Lichtschwächung geltende Temperaturskala am Amperemeter angebracht werden.

In dieser Weise lassen sich die in der Technik vorkommenden Temperaturen schnell und zwar sehr genau messen, da die Helligkeit einer leuchtenden Fläche mit einer sehr hohen Potenz der Temperatur fortschreitet. Theoretisch ist das Meßbereich für hohe Temperaturen unbegrenzt, da eine beliebig starke Lichtschwächung angewandt werden kann. Es wird nur vorausgesetzt, daß die Wien-Plancksche Formel für beliebig hohe Temperaturen gilt und daß der strahlende Körper schwarz ist. Ist der Körper nicht schwarz, so gibt das optische Pyrometer ebenso wie die Messung der Gesamtstrahlung nicht die wahre Temperatur, sondern die schwarze Temperatur an.

Hierbei kann aber der Fall eintreten, daß die schwarze Temperatur für verschiedene Wellenlängen verschieden ausfällt. Es ist also für die schwarze Temperatur die jedesmalige Wellenlänge, zu welcher sie gehören soll, mitanzugeben, da das Emissionsvermögen für verschiedene Wellenlängen sehr verschieden sein kann. Ein charakteristisches Beispiel hierfür ist der Auerstrumpf des Gasglühlichts, namentlich aber auch für die Abhängigkeit des Emissionsvermögens von der Temperatur.

Gleichung 2) $\lambda_{max.} \vartheta = C_1$, $C_1 = 2940$ oder das Wiensche Verschiebungsgesetz kommt für technische Temperaturmessungen nicht in Betracht. $\lambda_{max.}$ bedeutet diejenige Wellenlänge, in welcher die Intensität das Maximum erreicht. Die Bestimmung dieses Maximums setzt also sorgfältige, z. B. spektralbolometrische Messungen zu beiden Seiten des Maximums voraus, die Methode eignet sich daher nur für wissenschaftliche Untersuchungen.

Das gleiche gilt für Gleichung 3) $J_{max.} = C_2 \vartheta^5$, worin $J_{max.}$ die Intensität des Maximums verschiedener Isothermen bedeutet. Gleichung 4) $\int_0^{\infty} J d\lambda = \sigma \vartheta^4$ stellt das Stefan-Boltzmannsche Gesetz dar, welches der Integration von Gleichung 1 entspricht, Gleichung 4 gehört also unter die Gesamtstrahlung.

4c) Sonnenstrahlung. Unter den gemachten einschränkenden Voraussetzungen kann die Temperatur eines beliebig fernen Weltkörpers, z. B. der Sonne oder der Gestirne ebenso wie die Temperatur eines auf der Erde befindlichen glühenden Körpers gemessen werden.

Bei Benutzung von Gleichung 5 erhalten wir mit einem optischen Pyrometer für die Temperatur der Sonne 6060° abs. und zwar für verschiedene Wellenlängen im sichtbaren

Gebiet angenähert die gleiche Temperatur, so daß die Sonne wahrscheinlich als nahezu schwarzer Körper anzusehen ist.

Eine Schwierigkeit für die Messungen besteht darin, daß J_1 und J_2 an Größe sehr verschieden sind. Das Verhältnis $\frac{J_2}{J_1}$ ist ungefähr 0,00002, man muß daher eine sehr starke Lichtschwächung, z. B. durch Absorption, anwenden. Eine andere Methode der Lichtschwächung besteht darin, daß man die Sonne nicht direkt zum Pyrometer strahlen läßt, sondern senkrecht auf eine ebene, mit Magnesiumoxyd überzogene Platte, welche nun ihrerseits Strahlen zum Pyrometer sendet. Hierdurch tritt, abgesehen vom selektiven Reflexionsvermögen des Magnesiumoxyds, eine Lichtschwächung ein, welche gleich dem Quadrat des Verhältnisses des Radius r der Sonne zum Radius R der Erdbahn ist, also gleich $\frac{r^2}{R^2} = 0{,}00002$ ist.

Gleichung 2) $\lambda_{max}\,\vartheta = C_1$, $C_1 = 2940$ gestattet gleichfalls eine Messung der Sonnentemperatur, wenn man die Energiekurve der Sonne, also auch das Maximum kennt. Nach den von Langley beobachteten Energiekurven hat Very berechnet, daß ohne das Vorhandensein der Erdatmosphäre das Maximum der Energiekurve bei $\lambda = 0{,}532\,\mu$ liegen würde, woraus sich die Temperatur der Sonne gleich 5530° abs. ergibt. Abbot und Fowle berechneten dagegen, daß das Maximum bei $\lambda = 0{,}433\,\mu$ liegt, woraus sich die Temperatur der Sonne gleich 6790° abs. ergibt. Das Mittel aus beiden Werten ist 6160° abs.

Gleichung 3) $J_{max.} = C_2\,\vartheta^5$ bietet keine Vorteile für Temperaturmessungen.

Stellen wir die nach den verschiedenen Gleichungen gefundenen Werte zusammen, so ergibt sich:

Gleichung 1) 6060° abs.
Gleichung 2) 6160° abs.
Gleichung 3) 6030° abs.

Wie man sieht, stimmen die durch Strahlungsmessungen gefundenen Werte ziemlich überein, während die früheren Bestimmungen der Sonnentemperatur nicht nur sehr von einander abweichende, sondern ganz ungeheuerliche Werte lieferten.

Literatur. ***H. Rubens,*** *Zeitschr. f. Instr., 18. Jahrg.,* 65, *1898.* — ***S. P. Langley,*** *Sill. Journ. (3),* 21, *187, 1880.* — ***O. Lummer und F. Kurlbaum,*** *Ann. d. Phys. u. Chem.,* 46, *204, 1892.* — ***Nichols,*** *Astroph. Journ.,* 13, *101, 1901.* — ***Boys,*** *Proceed. of the Roy. Soc.,* 47, *480, 1890.* — ***Stefan,*** *Wien. Ber. (2),* 79, *391, 1879.* — ***Boltzmann,*** *Wied. Ann.,* 22, *291, 1884.* — ***F. Kurlbaum,*** *Ann. d. Phys. u. Chem.,* 65, *746, 1898.* — ***K. Angström,*** *Ann. d. Phys. u. Chem.,* 67, *633, 1899.* — ***H. W. Westphal,*** *Verh. d. Deutsch. Phys. Ges., 14. Jahrg., 987, 1912.* — ***O. Lummer und E. Pringsheim,*** *Verh. d. Deutsch. Phys. Ges.,* 1, *215, 1899.* — ***W. Wien,*** *Ann. d. Phys. u. Chem.,* 58, *662, 1896.* — ***M. Planck,*** *Verh. d. Deutsch. Phys. Ges.,* 2, *202, 1900.* — ***L. Holborn und F. Kurlbaum,*** *Berl. Akad. Ber. 1901, 712.* — ***H. Wanner,*** *Phys. Z. S.,* 3, *112, 1901.* — ***E. Pringsheim,*** *Physik der Sonne. 1910.*

F. Kurlbaum.

Strahlungsumformungen.

1. Einleitung. 2. Umformung von Strahlung in Wärme: a) In Nichtleitern. b) In Leitern. 3. Umformung in veränderte Strahlung: a) Rayleighs Theorie der Zerstreuung. b) Plancksche Dispersionstheorie. c) Theorie der Fluoreszenz und Phosphoreszenz. d) Zerstreuung an kleinen Metallteilchen. e) Regelmäßige Reflexion. 4. Umformung in elektrische und in chemische Energie (Quantenhypothese).

1. Einleitung. Unter Strahlung, deren Umformung Gegenstand des folgenden Artikels ist, soll jede elektromagnetische, nicht korpuskulare Strahlenart verstanden werden, d. h. elektrische Wellen, infrarotes, sichtbares und ultraviolettes Licht und Röntgenstrahlen. Trifft derartige Strahlung auf Materie, so wird im allgemeinen ein Teil zurückgeworfen — reflektiert, ein Teil der Strahlung tritt durch die Materie hindurch, ein Teil wird absorbiert, d. h. verschluckt und in andere Energie „umgeformt". Da auch die reflektierte und die durchgelassene Strahlungsenergie im allgemeinen andere Eigenschaften — hinsichtlich der Polarisationsverhältnisse oder der spektralen Zusammensetzung — besitzen als die auffallende, sind sie auch als „umgeformte" Strahlungen anzusehen. Deshalb sollen im folgenden als die bei Strahlungsumformungen wirklich in die Erscheinung tretenden Energiearten: Wärme, veränderte Strahlung, elektrische und chemische Energie unterschieden werden. Allerdings findet primär vermutlich stets eine Umwandlung in elektromagnetische Energie statt, wenigstens nimmt die Elektronentheorie der Absorption an, daß die Strahlungsenergie entweder durch einen Resonanzvorgang elektrisch geladener Molekülteile, von Elektronen oder Ionen, auf die Materie übertragen wird oder daß sie — in elektrisch leitenden Körpern — elektrische Ströme durch Bewegung freier Elektronen induziert. Diese Vorstellungen näher auszuführen ist Aufgabe des vorliegenden Artikels, während die beobachteten Erscheinungen der „Absorption, Lumineszenz, Fluoreszenz, Phosphoreszenz, Lichtelektrizität und Photochemie" in besonderen Artikeln besprochen werden.

2. Umformung von Strahlung in Wärme. Der Uebergang von Strahlung in Wärme wird im täglichen Leben häufig beobachtet: wenn sich die Glasbirne einer Glühlampe erwärmt, wenn ein von der Sonne bestrahltes Thermometer eine viel höhere Temperatur als ein beschattetes anzeigt, wenn ein offenes Feuer nasse Kleider trocknet. Auf Umformung von Strahlung in Wärme beruhen ferner z. B. die Wirkung, durch die ein Wassertrog den Glaskondensor einer Projektionsbogenlampe vor zu starker Erhitzung schützt, sowie die meisten Instrumente zur Messung oder zum Nachweis „strahlender Wärme" (wie der als „Bolometer" bezeichnete Platinstreifen, der durch Erwärmung seinen elektrischen Widerstand ändert).

Zur theoretischen Behandlung dieser Absorptionserscheinungen muß man Leiter der Elektrizität von Nichtleitern trennen.

2a) Absorption in Nichtleitern. Die reine Maxwellsche, elektromagnetische Lichttheorie hat für die Absorption des Lichtes in Nichtleitern ebensowenig Raum wie für die Dispersion. Erst die Berücksichtigung des Einflusses, den die Körpermoleküle auf die Geschwindigkeit einer über sie hinwegstreichenden Lichtwelle ausüben (vgl. den Artikel „Lichtdispersion"), liefert neben der Dispersion des Lichtes auch eine „Erklärung" der Lichtabsorption, allerdings nur auf Grund eines formalen Ansatzes, der die Absorption als einen reibungsähnlichen, im übrigen völlig unbekannten Vorgang behandelt. O. E. Meyer führte nämlich 1872 in die Differentialgleichung der Wellenbewegung (vgl. den Artikel „Lichtdispersion", Gleichung 1, S. 270) ein der Geschwindigkeit der Aetherteilchen proportionales Glied ein, gleichwie man die Reibung eines bewegten Körpers seiner Geschwindigkeit proportional setzt, und ebenso wie diese Reibung einen Teil der Bewegung verzehrt und in Wärme umwandelt, führt auf die Meyersche Hypothese eine Schwächung der Energie der schwingenden Aetherteilchen, d. h. der betrachteten Lichtwelle. Diese hypothetische Reibungskraft hat Helmholtz in die Sellmeiersche Gleichung der zum Mitschwingen erregten Moleküle eingesetzt (l. c. Gleichung 8, s. a unten, Gleichung 2), die mit der Gleichung einer gedämpften, erzwungenen Pendelschwingung identisch ist (vgl. den Artikel „Erzwungene Schwingungen"); durch diesen „der Reibung im Resultat ähnlichen Vorgang" sollte „die auf die schwingenden Moleküle übertragene lebendige Kraft der Wellenbewegung in innere, unregelmäßige (heute sagt man: ungeordnete) Bewegung der Moleküle, d. h. in Wärme" übergeführt werden. Die Energie der Lichtwelle erhält also die schwingungsfähigen Moleküle in Bewegung, während jene Reibung ihnen einen Teil ihrer Schwingungsenergie dauernd entzieht, so erleidet die Lichtenergie beim Durchdringen des Körpers einen Verlust, der Extinktion oder auch Absorption des Lichtes genannt wird. In der Tat ergibt sich so für die Abnahme eines das Medium durchsetzenden Lichtstrahls das durch die Erfahrung bestätigte Biot-Lambertsche Absorptionsgesetz, das aussagt, daß jede unendlich dünne Schicht der Länge dx den gleichen, dieser Länge dx proportionalen Bruchteil der eindringenden Intensität absorbiert; so daß die in das Medium eindringende Intensität I_0 der (im Vakuum gemessenen) Wellenlänge λ nach Durchsetzen der endlichen Schichtdicke l auf den Wert

$$J = J_0 . e^{-4\pi\varkappa l/\lambda} \qquad 1)$$

sinkt. Der so definierte Extinktionskoeffizient $\varkappa$ ändert sich dabei stark mit der Wellenlänge, besitzt an der Stelle der Eigenwellenlänge der mitschwingenden Moleküle (vgl. S. 811 u. Fig. 1) große Werte und fällt nach größeren sowohl als nach kleineren Wellenlängen rasch gegen Null ab. Diese „Absorptionskurve" ist um so breiter, erstreckt sich auf ein um so größeres Wellenlängengebiet, je größer der „Reibungskoeffizient", und je kleiner die Masse der mitschwingenden Teilchen ist. Zugleich bleibt durch diese Hypothese der Brechungsquotient n im Absorptionsgebiete endlich und zeigt den anomalen, mit der Wellenlänge wachsenden Verlauf. Diese Ueberlegung haben Helmholtz 1892 und Drude 1893 in ihre auf elektromagnetischer Grundlage basierende Dispersionstheorien stillschweigend übernommen, in der „quasielastisch" gebundene, elektrisch geladene Teilchen als mitschwingungsfähige Gebilde wirken. In der hieraus hervorgegangenen Elektronentheorie der Dispersion haben Drude und Voigt das Meyer-Helmholtzsche Reibungsglied ohne weitere Motivierung als einfachste Darstellung beobachteter Erscheinungen (sozusagen „phänomenologisch") beibehalten; dagegen ist dies Glied von Lorentz (1898) und von Planck (1902) auf verschiedene Weise elektronentheoretisch gedeutet worden.

Planck berücksichtigt die Strahlung, die die in Mitschwingung versetzten Teilchen („Resonatoren") — ebenso wie in Resonanz versetzte Stimmgabeln — selber wieder aussenden müssen. Ihre Energie geht der erregenden Lichtwelle verloren. Diese „Eigenstrahlung" addiert sich nun zwar zur ursprünglichen Welle, sie erfolgt jedoch diffus nach allen Seiten (ist also eine Art Fluoreszenz, vgl. Abschnitt 3c); in der Richtung der den Körper durchsetzenden Strahlung wird also mehr Energie entzogen als hinzu-

gefügt. Die Differenz liefert den Betrag der „absorbierten" Energie, die jedoch nicht, wie oben infolge der Reibung, in Wärme („konsumptive Dämpfung"), sondern in diffuse Strahlung („konservative Dämpfung") umgeformt worden ist; deshalb soll diese Theorie erst unter Abschnitt 3 behandelt, und es soll erst dort gezeigt werden, wie diese „Strahlungsdämpfung" mathematisch gerade wie eine Reibungskraft wirkt. Lorentz andererseits sieht von einer auf die Resonatoren wirkenden Reibungskraft ab, da die Elektronentheorie außer der Strahlungsdämpfung keine derartige Kraft kennt und diese keine Umformung in Wärme liefert. Vielmehr berücksichtigt er die aus der kinetischen Gastheorie her wohlbekannten Zusammenstöße der sich bewegenden Zentren, durch welche die regelmäßigen Schwingungen dieser Zentren plötzlich gestört und ihre geordnete Schwingungsenergie in ungeordnete, d. h. Wärmeenergie verwandelt wird.

Später (1905) hat Lorentz auf Grund eines (allerdings unvollständigen) quantitativen Vergleichs der Konsequenzen seiner Theorie mit experimentellen Ergebnissen an absorbierenden Dämpfen die Vorstellung der kinetischen Zusammenstöße als ungenügend fallen gelassen und Störungen der Schwingungen im Innern der einzelnen Moleküle angenommen, so daß freilich, wie Lorentz sagt, „die wahre Ursache der Absorption noch zu entdecken bleibt".

Die Lorentzsche Anschauung der „Störungen" führt zu dem Ergebnis, daß die oben erwähnten Dispersionsgleichungen (die n und $\varkappa$ als Funktionen von λ darstellen) fast unverändert beibehalten werden können (s. unten), nur erhält der unbestimmte Faktor des Reibungsgliedes die elektronentheoretische Bedeutung, die Zahl der sekundlichen „Störungen" der regelmäßigen Schwingungen zu messen. Gleichzeitig kommt in den Lorentzschen Formeln ebenso wie in denen von Planck noch ein bei der Mitwirkung vieler Resonatoren wichtiger Unterschied zum Ausdruck, der zwischen dem Ansatze von Drude-Voigt und demjenigen von Helmholtz, Lorentz und Planck bezüglich der die Resonatorschwingungen erregenden Kraft besteht. Während erstere für diese die elektrische Kraft $\mathfrak{E}$ des Feldes am Orte des Resonators einsetzen, berechnen sie Lorentz und Planck aus den Wirkungen der Nachbarmoleküle, was allerdings nur bis auf einen, allgemein nicht vollständig bestimmten Faktor ausführbar ist.

Betrachtet man nur eine Art von schwingungsfähigen Elektronen der Eigenfrequenz ν_0 (gleich der in der Zeit 2π erfolgenden Zahl von Schwingungen des freien ungedämpften Elektrons), ist $\mathfrak{N}$ ihre Zahl pro Volumeneinheit, m ihre Masse, e ihre Ladung (gemessen in absoluten elektrostatischen Einheiten), x ihre Amplitude zur Zeit t, so liegt den verschiedenen Theorien die Gleichung der erzwungenen Schwingung

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + g\frac{dx}{dt} + fx = e(\mathfrak{E}_x + a\mathfrak{P}_x) \qquad 2)$$

zugrunde, in der $\mathfrak{E}_x$ die X-Komponente der elektrischen Kraft ist, $\mathfrak{P}_x$, die X-Komponente der „Polarisation", der Gleichung

$$\mathfrak{P}_x = 4\pi\mathfrak{N}ex$$

genügt (vgl. Artikel „Elektonentheorie") und dadurch die Wirkung der benachbarten Resonatoren zum Ausdruck bringt; schließlich hängt f mit ν_0 durch die Gleichung

$$\frac{f}{m} = \nu_0^2$$

zusammen. Bei Drude-Voigt fehlt das Glied mit $\mathfrak{P}_x$, Lorentz setzt $a = s + {}^1/_3$, wobei s eine für jeden Körper konstante, exakt schwer bestimmbare Größe ist.

Wie man aus der Schwingungsgleichung 2) mit Hilfe der allgemeinen Gleichungen der Lichtfortpflanzung (oder den Maxwellschen Gleichungen) die Abhängigkeit der Brechungskoeffizienten n und des Extinktionskoeffizienten $\varkappa$ von der Wellenlänge λ berechnet, findet sich im Artikel „Lichtdispersion". Hier genüge das Resultat in Gestalt der folgenden Gleichungen, in denen zur Abkürzung $\frac{m}{g} = \nu'$ und $4\pi\mathfrak{N}\frac{e^2}{m} = \varrho$ gesetzt und an Stelle der Wellenlänge die Frequenz $\nu = \frac{2\pi c}{\lambda}$ eingeführt ist:

$$n^2 - \varkappa^2 - 1 = \frac{\varrho(\nu_0^2 - \nu^2 - a\varrho)}{(\nu_0^2 - \nu^2 - a\varrho)^2 + \nu^2\nu'^2} \qquad 3a)$$

$$2n\varkappa = \frac{\varrho\nu\nu'}{(\nu_0^2 - \nu^2 - a\varrho)^2 + \nu^2\nu'^2}. \qquad 3b)$$

Setzt man hier a = 0, so erhält man die Drude-Voigtschen Gleichungen. Der Lorentzschen Theorie der „Stöße" wird Rechnung getragen, wenn man, bis auf eine unbedeutende Korrektion, statt

$$\nu' = \frac{2}{\tau}$$

schreibt, wobei τ die mittlere Zeit vorstellt, während der die Schwingungen eines Teilchens ungestört vor sich gehen.

Sind mehrere Arten mitschwingungsfähiger Partikel vorhanden und rechnet man die Gleichungen 3) auf Wellenlängen um, so ergeben sich, für a = 0 die Sellmeier-Helmholtz-Kettelerschen Dispersionsformeln (vgl. den Artikel „Lichtdispersion", S. 272, Gleichung 9)

$$n^2 - \varkappa^2 - 1 = \Sigma_h \frac{D\lambda^2(\lambda^2 - \lambda_h^2)}{(\lambda^2 - \lambda_h^2)^2 + g'^2\lambda^2} \qquad 4a)$$

$$2n\varkappa = \Sigma_h \frac{Dg'\lambda^3}{(\lambda^2 - \lambda_h^2)^2 + g'^2\lambda^2}, \qquad 4b)$$

wobei $D = \frac{\varrho_h\lambda_h^2}{4\pi^2c^2}$ und $g' = \nu'\frac{\lambda_h}{2\pi c}$

gesetzt ist.

Zur Diskussion und zum Vergleich mit der Erfahrung betrachten wir die Gebiete normaler und diejenigen anomaler Dispersion getrennt:

1. Gebiet normaler Dispersion, d. h. λ weit von allen λ_h entfernt. Dann ist die Absorption sehr klein, $\varkappa^2$ gegen n^2 und $\nu\nu'$ gegen $\nu_0^2-\nu^2-c\varrho$ bezw. $g'\lambda$ gegen $\lambda^2-\lambda_h^2$ zu vernachlässigen, und es folgt aus Gleichung 3a) die durch die Erfahrung gut bestätigte Neumann-Kettelersche Dispersionsformel (vgl. den Artikel „Lichtdispersion" Gleichung 5) S. 270 und 10) S. 273 sowie den Artikel „Infrarot"). Durch Berechnung der Konstanten in Spezialfällen zeigt sich, daß für viele Substanzen die Eigenschwingungen λ_h teils im Infraroten ($\lambda_h > 1\,\mu$), teils im Ultravioletten ($\lambda_h < 0{,}3\,\mu$) liegen und daß das charakteristische Verhältnis von $\frac{e}{m}$ für die ersteren im allgemeinen mehr als 1000 mal so klein als für die letzteren ist: hieraus zog Drude den wichtigen Schluß, daß erstere von Elektronen (s. d.), letztere von Ionen, die materielle Maße enthalten, herrühren. Setzt man ferner in Gleichung 3a) $a = \frac{1}{3}$, so folgt

$$n^2-1 = \frac{1}{\frac{\nu_0^2-\nu^2}{\varrho}-\frac{1}{3}}$$

woraus sich leicht

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} = \frac{\varrho}{3(\nu_0^2-\nu^2)}$$

ergibt, die wichtige in vielen Fällen gut bestätigte Lorenz-Lorentzsche Formel, die aussagt, daß der Quotient $\frac{n^2-1}{n^2+2}$ für eine bestimmte Substanz und einen bestimmten Wert von ν der Dichte ϱ der Substanz proportional sein muß; für $a = 0$ folgt die weit weniger gut bestätigte Beziehung, daß n^2-1 bei konstantem ν proportional ϱ ist.

2. Gebiet anomaler Dispersion: a) schwache Absorption $\varkappa \ll 1$, d. h. $\frac{\varrho}{\nu_0\nu'} \ll 1$. Durch Vernachlässigung des Einflusses entfernterer Absorptionsgebiete ergibt sich aus Gleichung 3) mit $a = 0$

$$n - n_0 = \frac{\varrho(\nu_0-\nu)}{4n_0\nu_0\left[(\nu_0-\nu)^2+\frac{1}{4}\nu'^2\right]} \qquad 5a)$$

$$\varkappa = \frac{\varrho\nu'}{8n_0\nu_0\left[(\nu_0-\nu)^2+\frac{1}{4}\nu'^2\right]} \qquad 5b)$$

wo n_0 den im Absorptionsgebiet als konstant angenommenen Brechungsquotienten bedeutet, der in dem betrachteten Bereich um ν_0 herrschen würde, wenn die Resonatoren der Eigenfrequenz ν_0 nicht vorhanden wären. Gleichung 5b) stellt eine zu ν_0 (bezw. λ_0) symmetrische Kurve dar (vgl. Fig. 1), die an der Stelle $\nu-\nu_0 = \pm\frac{\nu'}{2}$ auf den halben Wert sinkt und für $\nu_0-\nu = \frac{\nu'}{5}$ bereits praktisch verschwindend klein ist. Mit wachsenden Werten von ν', d. h. wachsenden „Reibungskoeffizienten" g und abnehmender Masse m verbreitert sich die Absorptionskurve $\varkappa$. Der Maximalwert von $\varkappa$ nämlich $\varkappa_m = \frac{\varrho}{\nu\nu'}$ bleibt nach Voraussetzung immer klein gegen 1 und nimmt mit wachsendem ν' ab, mit wachsendem ϱ, d. h. wachsender Zentrendichte zu. Dieser Verlauf entspricht schmalen, scharfen Absorptionslinien,

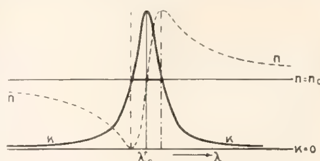


Fig. 1.

wie er, wenigstens qualitativ, in den D-Linien des Na-Dampfes oder den Absorptionslinien des leuchtenden Wasserstoffs beobachtet wird. Tatsächlich besitzt der beobachtete Dampf endliche Schichtdicke, so daß die experimentelle Untersuchung die Kurve des Absorptionsvermögens

$$A = 1 - \frac{J}{J_0} = 1 - e^{-4\pi\varkappa l/\lambda}$$

(vgl. Gleichung 1) liefert. Mit Berücksichtigung der Variation von $\varkappa$ (Gleichung 5b) folgt deshalb, daß sich die Spektrallinien mit wachsender Dämpfung ν', aber auch bei konstantem ν' mit wachsender Schichtdicke l und wachsender Zentrendichte $\mathfrak{N}$ verbreitern müssen, was tatsächlich an Gasen vielfach beobachtet wird (vgl. den Artikel „Spektroskopie"). Der Gang der Funktion $\varkappa$ im einzelnen ist bisher noch nicht genügend genau untersucht) dagegen derjenige von n mit Gleichung 5a, in guter Uebereinstimmung gefunden worden (durch Untersuchung an den Natrium- und Wasserstofflinien). In einzelnen Fällen ergab sich nur ein geringer Bruchteil aller vorhandenen Moleküle als an der Absorption beteiligt. Ob in Gasen die Zahl der gewöhnlichen Zusammenstöße zur Berechnung der Lorentzschen „Störungen" ausreicht, ist noch nicht entschieden; in festen und flüssigen Körpern scheint es nach J. Koenigsberger nicht der Fall zu sein.

b) Starke, sogenannte metallische Absorption. Hier folgt aus den allgemeinen Gleichungen 3) und 4) ein in bezug auf ν_0 und λ_h unsymmetrischer Verlauf von n und $\varkappa$, auch bei Beschränkung auf eine Zentrenart. Speziell der Extinktionskoeffizient fällt langsamer nach kleineren als nach größeren Wellenlängen ab, sein Maximum ist ein wenig gegen λ_h verschoben. In der Nähe von λ_h kann $\varkappa$-Werte, die größer als 1 sind, annehmen, so daß das Licht schon in Schichtdicken von der Größe einer Wellenlänge stark absorbiert wird, wie man es bei Metallen, stark absorbierenden Flüssigkeiten (Farbstofflösungen), bei festen Farbstoffen und bei etlichen Kristallen im Ultrarot (vgl. den Artikel „Lichtreflexion" und „Infrarot" unter Reststrahlen) beobacntet (vgl. Fig. 2, die nach Goldhammer die Dispersion, Absorption und Reflexion einer idealen stark absorbierenden Substanz, bei mäßiger Dämpfung darstellt). Exakte experimentelle Messungen (von Pflüger, Wood u. a.) des Verlaufs von n und $\varkappa$ erstrecken sich bisher nur auf Absorptionsgebiete, in denen sich mehrere Eigenschwingungen überlagern. Infolge-

dessen ist die Zahl der aus den Messungen von n und $\varkappa$ abzuleitenden Konstanten (3 für jede Resonanzstelle: ϱ, ν' und ν_0) zu groß, als daß das vorliegende Versuchsmaterial ein sicheres Urteil über die Gültigkeit der allgemeinen Formeln 3) und 4) erlaubte.

2b) Absorption in elektrisch leitenden Körpern. In Substanzen, die die Elektrizität leiten, ergibt sich bereits auf Grund der reinen Maxwellschen Lichttheorie Absorption des Lichtes: die periodisch wechselnde elektrische Kraft der Lichtwelle ruft in dem galvanisch leitenden Körper periodisch wechselnde Ströme hervor, und die dadurch erzeugte Joulesche Wärme bedeutet einen äquivalenten Energieverlust der auffallenden Lichtwelle. So geht deren geordnete Energie offenbar in ungeordnete Molekularenergie über. In der Elektronentheorie der Metalle wirkt die periodisch wechselnde elektrische Kraft der Lichtwelle auf die zwischen den Metallatomen frei beweglichen Elektronen; diese übertragen durch die Zusammenstöße mit den Metallatomen den letzteren einen Teil ihrer so gewonnenen Bewegungsenergie, und dadurch erhöht sich die Temperatur des Metalles auf Kosten der Energie der hindurchgehenden Lichtwelle.

Theoretisch äußert sich dieser Einfluß der Leitfähigkeit darin, daß an Stelle der reellen Dielektrizitätskonstante ε, die bei Isolatoren gleich dem Quadrat des Brechungsquotienten für lange Wellen ist

$$\varepsilon = n^2 \tag{6a}$$

(vgl. den Art. „Lichtdispersion" S. 273 und „Strahlende Aetherenergie"), die imaginäre Größe

$$\varepsilon' = \varepsilon - i2\sigma \frac{\lambda}{c} \tag{6b}$$

auftritt, die analog Gleichung 6a)

$$(n - i\varkappa)^2$$

gesetzt wird. Hierbei ist σ die nach absoluten elektrostatischem Maß gemessene spezifische elektrische Leitfähigkeit. So wird

$$n^2 - \varkappa^2 = \varepsilon \text{ und } n\varkappa = \sigma \frac{\lambda}{c} = \sigma \frac{2\pi}{\nu}. \tag{7}$$

Die so gewonnenen Formeln haben sich glänzend im Gebiet der ultraroten Wellen an Metallen bestätigt, indem Hagen und Rubens aus rein optischen Messungen mit Wellen, deren Länge $> 10\ \mu$ war, die elektrische Leitfähigkeit vieler Metalle und ihre Aenderung mit der Temperatur quantitativ berechnen konnten (vgl. den Artikel „Lichtreflexion" S. 355).

Für kürzere Wellen jedoch, bereits für $\lambda = 4\ \mu$, ergaben sich Abweichungen zwi-

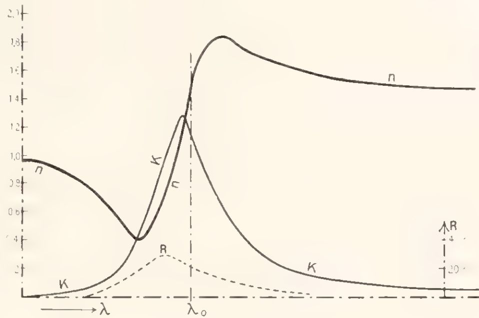


Fig. 2.

schen Theorie und Experiment. In der Tat ist im Sichtbaren an Metallen häufig

$$n\varkappa < \sigma \frac{\lambda}{c} \text{ und } \varkappa > n$$

beobachtet worden, so daß ε (nach Gleichung 7) negativ würde (Näheres vgl. in dem Artikel „Lichtreflexion" z. B. die Tabelle auf S. 354, wo k an Stelle des hier benutzten $\varkappa$ geschrieben ist). Diese Widersprüche lösen sich, wenn man annimmt, daß die den elektrischen Strom transportierenden freien Elektronen infolge ihrer trägen Masse schnell wechselnden Kräften (den Lichtschwingungen) einen Trägheitswiderstand entgegensetzen, so daß die Leitfähigkeit der Metalle für Wechselströme, deren Periode von der Größe der Lichtschwingungen ist, außerordentlich vermindert ist gegenüber ihrer Leitfähigkeit für stationären Strom, also ebenfalls eine Funktion der Periode dieser Schwingungen wird (Drude).

Der einfachste Ansatz für die X-Komponente der Bewegungsgleichung einer Art solcher freien Elektronen ist:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + g \frac{dx}{dt} = e\mathfrak{E}_x, \tag{8}$$

die sich von der Gleichung 2) der erzwungenen Schwingung gebundener Elektronen wesentlich nur durch Fehlen der „quasielastischen" Kraft f.x unterscheidet, g hat hier die Bedeutung des reziproken Wertes einer Art „Beweglichkeit" v des Elektrons ($g = \frac{1}{v}$), die mit der Leitfähigkeit σ durch die Gleichung $\sigma = \mathfrak{N} e^2 v$ verknüpft ist. Die Durchführung der Rechnung

ergibt, falls man verschiedene Arten frei beweglicher Elektronen annimmt, in der oben benutzten Schreibweise die Gleichungen:

$$\left.\begin{aligned} n^2-\varkappa^2 &= 1+\Sigma_h \frac{\varrho'_h}{\nu^2-\nu'^2_h} \\ 2n\varkappa &= \Sigma_h \frac{\varrho_h \nu'_h}{\nu(\nu^2-\nu'^2_h)}+\Sigma_h \frac{4\pi\sigma_h}{\nu(1+\nu^2 m_h^2 \nu_h^2)} \end{aligned}\right\} \quad 9)$$

Es kann also jetzt ohne inneren Widerspruch $\varkappa > n$ sein, da

$$\Sigma \frac{\varrho_h}{\nu^2-\nu'^2_h} > 1$$

werden kann, ferner wird im allgemeinen

$$n\varkappa < \frac{\sigma 2\pi}{\nu} \text{ sein,}$$

und zwar nach Gleichung 9b) um so mehr, je größer ν, je kleiner λ und je größer σ (d. h. v) ist (σ für Hg $= 10^{16}$). So erklärt es sich auch, daß im Gebiet der Lichtwellen die Elektrolyte gut durchsichtig sind, da ihre galvanische Leitfähigkeit mehr als 100000 mal so klein ist als die der Metalle (für H_2SO_4 von 30% ist $\sigma = 10^{11}$). Der große Wert der trägen Masse m_h der elektrolytischen Ionen verhindert, daß dieselben den raschen Wechseln der elektrischen Kraft der Lichtwelle folgen, wie schon E. Cohn 1889 bemerkt hat; je kleiner aber ν, je größer λ, um so größere Werte muß $\varkappa$ annehmen.

Neuere genaue Messungen von n und $\varkappa$ (vg. die Artikel „Lichtreflexion" S. 354 und „Lichtdispersion" S. 268) an Metallen zeigen, daß auch die so modifizierten Gleichungen (9) mit der Erfahrung im allgemeinen nicht genau übereinstimmen. Im Falle einer Elektronenart und falls $n^2-\varkappa^2 > 1$ angesehen werden kann, würde sich aus ihnen der in Figur 3 gezeichnete (nach Voigt) einfache Verlauf von n und $\varkappa$ ergeben, d. h. die Dispersion wäre überall „anomal" (Fig. 3). So einfach liegen die

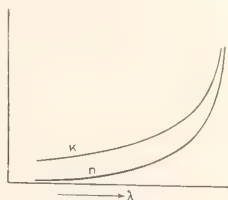


Fig. 3.

Verhältnisse z. B. bei Quecksilber. Im allgemeinen jedoch muß man außer den hier berücksichtigten freien Elektronen auch gebundene annehmen, d. h. die oben skizzierten Betrachtungen für Isolatoren mit den eben besprochenen verknüpfen. So ergeben sich für die Metalle meist im Ultraviolett liegende Eigenschwingungen (Voigt, Minor, Meier).

Eine wesentliche Stütze haben die Erklärungen der optischen Eigenschaften der Metalle durch freie Elektronen — wenigstens in Gebieten, die weit entfernt von den eben genannten Eigenschwingungen liegen — dadurch erhalten, daß H. A. Lorentz aus der Bewegung der freien Elektronen und unter Zugrundelegung des Kirchhoffschen Satzes von der Proportionalität des Emissions- und Absorptionsvermögens eines Temperaturstrahlers das für lange Wellen gültige Rayleighsche Strahlungsgesetz ableiten konnte (vgl. den Artikel „Strahlung").

3. Umformung in veränderte Strahlung. 3a) Rayleighs Theorie der Zerstreuung. Zur Erklärung der blauen Himmelsfarbe und der Polarisation des Himmelslichtes hat J. W. Strutt (der spätere Lord Rayleigh) (1871) im Anschluß an Tyndallsche Ueberlegungen die Veränderungen studiert, die eine Lichtwelle durch Beugung an kleinen, materiellen Teilchen erfährt, Erscheinungen, die heute als „Tyndalleffekt" oder als „Opaleszenz trüber Medien" bezeichnet werden. Uebrigens haben schon vor Tyndall Lionardo da Vinci, Newton und besonders Goethe ähnliche Ideen ausgesprochen. Durch alleinige Berücksichtigung des Dichteunterschiedes zwischen einem suspendierten als klein im Vergleich zur Lichtwellenlänge vorausgesetzten Teilchen und der Umgebung (also ohne jede Resonanzvorstellungen) fand Rayleigh die Intensität des in beliebiger Richtung von dem kleinen Teilchen abgebeugten Lichtes umgekehrt proportional der 4. Potenz der Wellenlänge, so daß bei auffallendem weißen Licht vornehmlich kurzwelliges, blaues Licht zerstreut wird. Dies abgebeugte Licht ist auch bei einfallendem natürlichen Licht polarisiert, Polarisationsebene ist die Ebene des primären und des gebeugten Strahls. Die Wirkung vieler unregelmäßig angeordneter Teilchen addiert sich, so daß man aus quantitativen Messungen auf die Zahl der wirkenden Teilchen pro Volumeneinheit schließen kann. Rayleigh hat seine Berechnungen später auch auf elektromagnetischer Grundlage formuliert, wobei statt des Unterschiedes der Dichte der der Dielektrizitätskonstanten berücksichtigt wurde. Ferner zeigte er, daß die Annahme fremder, eingelagerter Teilchen — etwa Staub — gar nicht nötig ist, sondern daß die Wirkung der Luftmoleküle selbst genügt.

Nach Rayleighs Theorie erfährt eine auffallende Welle der Intensität E innerhalb einer Schicht der Dicke dx, in der N zerstreuende Teilchen pro Volumeneinheit vorhanden sind, infolge der Zerstreuung eine Abnahme.

$$dE = k.E.dx.$$

Infolgedessen sinkt eine auf eine zerstreuende Schicht auffallende Intensität J_0 nach Durchsetzen der Schichtdicke x auf den Wert

$$E = E_0 e^{-kx}, \text{ wo} \qquad 10a)$$

$$k = \frac{32\pi^3(n-1)^2}{3N\lambda^4} \qquad 10b)$$

ist und n den Brechungsquotienten des durch die Teilchen veränderten Mediums bedeutet. Der fehlende Bruchteil wird von den betreffenden Teilchen seitlich diffus zerstreut. Aus der Abnahme, die hiernach die Helligkeit von Sternen erleiden muß, wenn sie in verschiedener Höhe über dem Horizont gesehen werden, so daß ihr Licht verschieden dicke, zerstreuende Luftschichten durchdrungen hat, kann man die Zahl N der zerstreuenden Teilchen berechnen; so findet man nach Lord Kelvin (1902) eine Zahl, die nahe mit der „Loschmidtschen Zahl" der Luftmoleküle pro ccm ($2{,}8 . 10^{19}$) übereinstimmt, die man heute z. B. aus radioaktiven oder Strahlungsmessungen (s. d.) sehr genau berechnen kann. Ebenso ist die Rayleigsche Theorie imstande, von der Polarisation des Himmelslichtes Rechenschaft zu geben, allerdings ist die Uebereinstimmung zwischen Theorie und Erfahrung quantitativ nicht vollkommen. Ueberhaupt ist bei einem quantitativen Vergleich — auch bezüglich der Abhängigkeit der Intensität des gebeugten Lichtes von der Wellenlänge — zu berücksichtigen, daß das gebeugte Licht durch ebensolche Veränderung wie das ursprünglich auffallende Licht wieder röter wird, ebenso wirken größere suspendierte Teilchen, ferner wird der ursprüngliche Effekt durch wiederholte Reflexion und Zerstreuung an der Erdoberfläche gestört. Schließlich hat Schuster berechnet, daß die Intensitätsänderung des von einer diffus strahlenden Fläche ausgehenden Lichtes innerhalb einer dicken, zerstreuend wirkenden Schicht nicht nach dem obigen Gesetz 10a) vor sich geht, vielmehr, falls keine andere Absorption erfolgt nach dem Gesetz

$$J = J_0 \frac{2}{2 + k},$$

wo k die obige Bedeutung (Gl. 10b) hat.

Jedenfalls ist die rote und gelbe Farbe der auf- und untergehenden Sonne und des Mondes — als komplementär zum abgebeugten Violett — durch Rayleighsche Zerstreuung an Verunreinigungen der Atmosphäre (oder an ihr selbst) zu erklären, wie ja das durch Rauchwolken, durch eine ungefärbte Milchglasglocke, durch Emulsionen z. B. von Mastix in Wasser, hindurchgegangene Licht rötlich-gelb ist, während das von den Rauchteilchen oder der Emulsion abgebeugte Licht bläulich erscheint. (Dagegen ist ein durch eine optisch leere Flüssigkeit hindurchgehender Lichtstrahl unsichtbar.) Besonders wirksam sind Tyndalls aktinische Wolken organischer, durch das Licht selbst zersetzter Substanzen oder nach Wood der Nebel von Natriumdampf (s. unten unter 3d). Auch die Polarisationsverhältnisse von Licht, das von künstlich erzeugten „trüben Lösungen" stammt, zeigen bemerkenswerte Uebereinstimmung mit der Theorie. Auf gleiche Weise erklärt sich nach Smoluchowski (1908) die Opaleszenz von Flüssigkeiten resp. Gasen in der Nähe des „kritischen" Zustandes (vgl. den Artikel „Energielehre") sowie von Flüssigkeitsgemischen in der Nähe des kritischen Mischungsverhältnisses und der kritischen Temperatur; denn nach unseren molekularen Vorstellungen müssen die Flüssigkeiten in der Nähe der betreffenden Zustände starke lokale Verdichtungen und Verdünnungen, also „körnige" Struktur besitzen.

Die diffusse seitliche Beugung an kleinsten Teilchen bildet ferner die Grundlage zur „Sichtbarmachung ultramikroskopischer Teilchen" (Siedentopf und Zsigmondy), die für die moderne Mikroskopie eine große Bedeutung besitzt (vgl. die Artikel „Lichtbeugung" und besonders „Mikroskopische Technik" S. 894ff.). Schließlich hat schon Soret (1869) die blaue Farbe sowie die Polarisation des z. B. von dem Genfer See zerstreuten Lichtes durch Diffusion an feinsten suspendierten Teilchen zu erklären versucht, eine Ansicht, die in neuerer Zeit besonders von Abegg vertreten worden ist. O. von und zu Aufseß zeigte allerdings im Jahre 1904, daß die Farben verschiedener bayrischer Seen, die von der blauen Eigenfarbe des Wassers abwichen, durch chemische Ursache bedingt, also wahre selektive Absorption (s. Abschnitt 2a) ist, da die Absorptionskurve eines künstlichen „trüben Mediums einen anderen Verlauf zeigte als die der untersuchten Seen.

3b) Plancksche Dispersionstheorie Die besprochene Rayleighsche Beziehung (Gleichung 10) kann man, worauf Mie zuerst hinwies, auf einem ganz andern und strengeren Wege ableiten, nämlich aus der Planckschen Dispersionstheorie. Die Grundlage dieser Theorie ist wie die aller Dispersionstheorien, das Resonanzprinzip. Planck nimmt die als elektrische Resonatoren wirkenden Moleküle als ruhend an, um eine übersichtliche Theorie mit möglichst wenigen Konstanten zu erhalten. Dadurch bleiben natürlich die Zusammenstöße unberücksichtigt, zugleich entfällt die Möglichkeit einer plausiblen „konsumptiven" Dämpfung. Dagegen berücksichtigt Planck die Eigenstrahlung der Resonatoren, die, wie oben besprochen, eine Schwächung der durchgehenden Lichtwelle bewirkt (und sich in einer Art Fluoreszenz des bestrahlten Körpers äußern müßte, vgl. Abschnitt 3c). (Schon Sellmeier (1872) hatte sich übrigens den Vorgang der Absorption als auf der Ausstrahlung der resonierenden Moleküle beruhend vorgestellt.) Im übrigen steht die Plancksche Theorie am nächsten der oben skizzierten Lorentzschen Dispersionstheorie; speziell wird die das schwingende Teilchen erregende Kraft nicht gleich der elektrischen Kraft

der Lichtwelle gesetzt, sondern ähnlich wie bei Lorentz berechnet (s. oben).

Bezeichnet σ das als klein vorausgesetzte logarithmische Dekrement der Amplitude x des Resonators — d. h. den natürlichen Logarithmus des Verhältnisses zweier aufeinander folgender Amplituden — so tritt bei Planck an die Stelle der Schwingungsgleichung 2) der Lorentzschen Theorie (s. oben S. 810) bei im übrigen gleicher Bezeichnungsweise die folgende Gleichung:

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \frac{\sigma}{\pi\nu_0}\frac{d^3x}{dt^3} + \nu_0^2 x = \frac{3c^3\sigma}{2\pi\nu_0}\mathfrak{E}_x - \frac{2\mathfrak{N}c^3\sigma}{\nu_0} x \qquad 11a)$$

Praktisch kann man meist

$$\frac{d^3x}{dt^3} = -\frac{dx}{dt}\nu_0^2 \qquad 11b)$$

schreiben, so daß die Aehnlichkeit der Strahlungsdämpfung mit einer Reibungskraft zutage tritt. σ vertritt hier also die Rolle des Dämpfungsfaktors ν' und zwar wäre $\sigma = \frac{\pi}{\nu_0}\nu'$ zu setzen. Bestehen die Resonatorschwingungen in der Bewegung eines Ions mit der Masse m, wie in den anderen Dispersionstheorien angenommen wird, so läßt sich σ ausdrücken durch die Gleichung

$$\sigma = \frac{2\pi\nu_0 e^2}{3c^3 m}; \qquad 11c)$$

die Plancksche Theorie enthält also statt der vier charakteristischen Konstanten e, m, ν_0 und ν' nur deren drei. Infolge Gleichung 11c) verwandelt sich das letzte Glied $\frac{2\mathfrak{N}c^3\sigma}{\nu_0}$ der Gleichung 11a) in $\frac{4}{3}\pi\mathfrak{N}\frac{e^2}{m}x$, so daß der Lorentzsche Faktor a der Polarisation $\mathfrak{P}_x$ (s. Gleichung 2) bei Planck durch $\frac{1}{3}$ ersetzt ist (s = 0). Besitzt ferner das „Lichtion" keine ponderable, sondern nur elektromagnetische Masse und hat es die Gestalt einer Kugel vom Radius ϱ mit gleichmäßig verteilter Oberflächenladung, so ist nach Abraham

$$\varrho = \frac{c\sigma}{\pi\nu_0}. \qquad 11d)$$

Formal lassen sich die Ergebnisse der Planckschen Theorie genau wie die der Lorentzschen formulieren, so daß im wesentlichen auf die obigen Bemerkungen verwiesen werden kann (s. oben S. 812). Im einzelnen treten scheinbare Unterschiede dadurch auf, daß sich bisweilen (z. B. im Werte von km bei schwacher Absorption) die Dämpfung zufolge den Gleichungen 11b) und 11c) im Gegensatz zu den anderen Theorien forthebt.

Wegen der Beziehung zur Rayleighschen Formel (Gleichung 10) interessiert uns hier besonders das Gebiet der normalen Dispersion. In demselben gilt für den Brechungsquotienten die gleiche Formel wie in der Lorentzschen Theorie, mit denselben Konsequenzen (s. oben S. 812). Der Extinktionskoeffizient $\varkappa$ läßt sich aber jetzt explizite berechnen, und Planck findet für ihn den Wert

$$\varkappa = \frac{2\pi^2}{3\mathfrak{N}\lambda^3}\frac{(n^2-1)^2}{n}, \qquad 11e)$$

(z. B. für Wasserstoff von 0° C und Atmosphärendruck nach den Messungen von Ketteler bei $\lambda = 589\ \mu\mu$ $\varkappa = 10^{-13}$). Diese Extinktion ist nun im wesentlichen identisch mit der von Rayleigh berechneten. Vergleicht man die Gleichungen 1) und 10a) bezw. 10b) und 11e), so sieht man, daß Rayleighs k in der hier benutzten Bezeichnung $= \frac{4\pi\varkappa}{\lambda}$ ist, so daß Gleichung 11e) übergeht in

$$k = \frac{8\pi^3}{3\mathfrak{N}\lambda^4}\frac{(n^2-1)^2}{n};$$

und diese Gleichung stimmt mit Gleichung 10b) vollkommen überein, wenn $n^2 - 1 = 2(n-1)$ gesetzt wird, was für Gase ($n \sim 1$) unbedenklich geschehen kann. Dagegen besteht bezüglich der Dispersion ein prinzipieller Unterschied zwischen beiden Theorien, da die Rayleighsche Theorie ohne den Resonanzbegriff operiert und infolgedessen der Dispersion überhaupt keine Rechnung trägt.

3c) Vergleich mit dem Experiment; Theorie der Fluoreszenz und Phosphoreszenz. Eine große Bedeutung hat die Strahlungsdämpfung dadurch gewonnen, daß es Planck auf Grund dieser Vorstellung gelungen ist, die Theorie der Strahlungsumformung im Falle der „stationären Hohlraumstrahlung" durchzuführen und — allerdings durch Einführung der neuen Hypothese des elementaren Wirkungsquantums (s. unten S. 819) — das durch die Erfahrung bestätigte „Plancksche Strahlungsgesetz" abzuleiten (vgl. den Artikel „Thermodynamik der Strahlung"). Ferner muß die Ableitung der Rayleighschen Formel (Gleichungen 10a) und 10b)) aus der Planckschen Dispersionstheorie jedenfalls als eine Bestätigung der Grundlagen dieser Theorie angesehen werden. Ob und in welchen Fällen die Plancksche Zerstreuung ausreicht die beobachtete Dämpfung und Absorption zu beschreiben, ist noch nicht entschieden; die Umformung von Strahlung in Wärme kann sie, ihrer ganzen Anlage entsprechend (s. oben), natürlich nicht erklären.

Auch im Falle der Absorption leuchtender Dämpfe sind die beobachteten Werte von $\varkappa$ bedeutend größer, als aus der Strahlungsdämpfung folgen würde, so daß andere Dämpfungsursachen, speziell die Lorentzschen „Störungen" zur Erklärung nötig sind. Aber im Falle sehr verdünnter Dämpfe, in denen Zusammenstöße relativ selten erfolgen — wie bei Quecksilberdampf von 0,001 mm Druck oder bei Kanalstrahlen, die in ein hohes Vakuum eintreten — scheint Dämpfung infolge der Eigenstrahlung der Resonatoren nachweisbar zu sein. Speziell zeigen die besonders von Wood beschriebenen Erscheinungen der „Resonanzstrahlung" (vgl. die Artikel „Spektroskopie" und „Lumineszenz"), bei denen Bestrahlung eines Dampfes mit monochromatischem Licht

diesen zur Fluoreszenz anregt, direkt die von Planck behandelte Eigenstrahlung der resonierenden Moleküle, wenigstens in dem einfachsten Fall, daß das Fluoreszenzlicht nur die gleiche Spektrallinie enthält wie das erregende Licht. Im allgemeinen treten jedoch im Fluoreszenzlicht auch von Gasen eine gewaltige Zahl anderer Linien auf, die mit der erregenden anscheinend in gesetzmäßigem Zusammenhange stehen und das sogenannte „Resonanzspektrum" bilden.

Bei der Fluoreszenz und Phosphoreszenz (s. dort und vgl. den Artikel „Lumineszenz") fester und flüssiger Körper ist der Farbunterschied zwischen erregendem, d. h. absorbiertem, und ausgestrahltem Licht gerade das Charakteristische: einige der wenigen allgemeinen Gesetzmäßigkeiten dieser Erscheinungen ist die sogenannte „Stokessche Regel", nach welcher der Bereich und das Maximum des Fluoreszenzlichtes im Gebiete größerer Wellenlänge als das erregende Licht liegen. Reine Resonanz genügt jedenfalls zur Erklärung nicht. Auch die von Lommel aufgestellte Theorie, daß die ausgesandten Farben als „Oberschwingungen" der resonierenden Teilchen anzusehen seien, ist nicht als mit der Erfahrung im Einklang zu betrachten, da diese Theorie Absorption an bestimmten Stellen im Ultrarot („Grundschwingung") verlangt, an denen tatsächlich keine vorhanden ist. Der Gedanke an Koppelungen verschiedener resonanzfähiger Zentren liegt nahe, ist aber theoretisch bisher nicht durchgeführt worden. Wahrscheinlich spielt sowohl bei der Fluoreszenz wie bei der Phosphoreszenz der „lichtelektrische Effekt" eine große Rolle (s. dort und vgl. den Artikel „Lumineszenz" S. 517 und unten S. 819), indem durch das Licht Elektronen aus den Molekülen bezw. Atomen ausgelöst werden. Die Rückkehr dieser Elektronen zum Atom soll nach den Vorstellungen von E. Wiedemann, Lenard, Voigt, Stark u. a. Veranlassung zu Schwingungen anderer Elektronen und zur Lichtaussendung sein. Im Falle der Fluoreszenz findet diese Rückkehr des lichtelektrisch ausgelösten Elektrons momentan statt, im Falle der Phosphoreszenz mehr oder weniger langsam, und die Geschwindigkeit der Rückkehr kann durch Temperaturerhöhung oder Bestrahlung mit ultrarotem Licht wesentlich beschleunigt werden. Die Stokessche Regel (s. oben) ergibt sich freilich aus den genannten Vorstellungen nicht ohne weiteres; zu deren Erklärung hat Einstein die sogenannte Quantenhypothese herangezogen, von der gelegentlich der lichtelektrischen und photochemischen Prozesse zu sprechen sein wird (s. unten S. 819).

Als eine Art Fluoreszenz ist auch ein Teil der sekundären Röntgenstrahlen anzusehen, die beim Auftreffen primärer Röntgenstrahlen auf einen beliebigen materiellen Körper entstehen (Näheres vgl. in dem Artikel „Röntgenstrahlen").

3d) Zerstreuung an kleinen Metallteilchen. Wesentlich komplizierter liegen die Verhältnisse, wenn die kleinen, das Licht abbeugenden Teilchen elektrische Leitfähigkeit besitzen, wie es z. B. bei zerstäubten Metallschichten oder kolloidalen Metalllösungen der Fall ist. Die ursprüngliche Ansicht, daß derartige Substanzen auch optisch als vollkommene Leiter der Elektrizität anzusehen seien, ist entsprechend den obigen elektronentheoretischen Betrachtungen (s. unter 2b) unhaltbar: infolge der Trägheit der Elektronen ist die „Metallleitfähigkeit" gegenüber Schwingungen von der Periode der Lichtwellen wesentlich kleiner als gegenüber einem stationären Strom (Pockels s. o. S. 813). Infolgedessen ist die auf unendlich guter Leitfähigkeit der kleinen Metallkugeln basierende Thomsonsche Theorie im Gebiet der Lichtwellen nicht anwendbar. Da ferner die Strahlungsdämpfung der elektrischen Eigenschwingungen leitender Kugeln sehr groß und infolgedessen die Resonanz unscharf ist (vgl. den Artikel „Schwingungen. Erzwungene Schwingungen") — im Gegensatz zu den von Planck untersuchten Teilchen mit intramolekularer Resonanz — so sind die an kolloidalen Lösungen von Ag, Au oder Pt oder an feinen Metallniederschlägen von Na, K oder Li im durchgehenden und reflektierten bezw. zerstreuten Licht beobachteten selektiven Färbungen (Wood, Kossonogoff) nicht durch „optische Resonanz" zu erklären; [noch weniger übrigens die an Schmetterlingsflügeln und anderen kleinen dielektrischen Teilchen beobachteten und bisweilen derartig gedeuteten Färbungen, da hier die mitschwingenden Gebilde noch größer und die Schwingungen selbst entsprechend noch stärker gedämpft sind. Dagegen ist im Gebiet langer elektromagnetischer Wellen, wo den Metallen ihre große Leitfähigkeit zukommt, und an Resonatoren, deren Querdimensionen klein gegen die Wellenlänge sind, tatsächlich Resonanz beobachtet worden — von Garbasso u. a. mit elektrischen Wellen, von Rubens und Nichols mit ultraroten Wellen (von 23.7 μ Länge) (vgl. die Artikel „Schwingungen. Elektrische Schwingungen" und „Infrarot")]. Unter der Annahme sehr kleiner Metallteilchen lassen sich die Beobachtungen von Ehrenhaft sowie die von Kirchner und Zsigmondy (an eintrocknender Gelatine, die kolloidales Gold enthielt) aus der Rayleighschen Theorie der Zerstreuung (s. oben) ungezwungen ableiten (J. C. Maxwell-Garnett). Allgemein ist das Problem der

optischen Erscheinungen an fein verteilten kugelförmigen Metallteilchen von Mie gelöst worden: indem er diesen Teilchen die durch optische Messungen an festen Metallen bestimmten Koeffizienten der Absorption und Brechung zuschreibt, berücksichtigt er sowohl die infolge ihrer Leitfähigkeit durch Joulesche Wärme als auch die durch diffuse Zerstreuung bewirkte Extinktion einer durchgehenden ebenen Welle und erhält Resultate, die durch die ultramikroskopisch beobachteten Tatsachen vorzüglich bestätigt werden (Steubing). Schließlich haben Gans und Happel die Theorie für ellipsoidische Teilchen und nicht verdünnte Lösungen weitergeführt, und Debye hat die Beugung des Lichtes an vollkommen reflektierenden und dielektrischen Zylindern mit Anwendung auf die Theorie des Regenbogens untersucht.

3e) Regelmäßige Reflexion. Zusammenhang zwischen Zerstreuung, Absorption und Reflexion. Die Veränderungen bezüglich Intensität und Polarisation, die ein Lichtstrahl durch Reflexion erleidet, beruhen ebenso wie die Erscheinungen der Dispersion und Absorption auf der Einwirkung der Körpermoleküle. Auf Grund der Planckschen Theorie der Zerstreuung kann man sich vorstellen (Lummer), daß sich die an den Molekülen der Körperoberfläche „zerstreute" Strahlung einer auffallenden ebenen Welle zusammensetzt zur reflektierten Welle. Diese Anschauung hat sich tatsächlich im Falle der als Raumgitter angeordneten Moleküle eines Kristalles bestätigt (Ewald): die einzelnen zerstreuten Strahlen interferieren miteinander und liefern dadurch die regelmäßig reflektierte und die gebrochene Welle. Bei unregelmäßig angeordneten Molekülen ist eine derartige Berechnung bisher nicht durchgeführt. Jedoch liefern allgemein die Grenzbedingungen der elektromagnetischen Lichttheorie — Stetigkeit der magnetischen Kraft sowie der Tangentialkomponenten der elektrischen Kraft, Unstetigkeit ihrer Normalkomponente — die Erscheinungen der gewöhnlichen Reflexion bezüglich der Intensitäts- und Polarisationsverhältnisse (vgl. die Artikel „Lichtreflexion" sowie besonders „Lichtpolarisation" S. 315ff. Ebendort die theoretische Behandlung der elliptischen Polarisation bei der Reflexion infolge dünner Uebergangsschichten sowie bei Totalreflexion).

Auch bezüglich der Farbe findet bei der Reflexion häufig eine „Umformung" der auffallenden Strahlung statt, sei es dadurch, daß ein Teil des Lichtes erst im Innern der betreffenden absorbierenden Substanz reflektiert wird, also erst austritt, nachdem er in der Substanz Absorption erlitten hat; sei es — und dies ist der theoretisch interessantere Fall — infolge selektiver Reflexion an der Oberfläche eines stark (metallisch) absorbierenden Körpers. Im ersteren Fall besitzt der reflektierte Strahl die gleiche Farbe wie ein durch die Substanz hindurchgegangener Strahl, im zweiten Fall die dazu komplementäre Farbe (vgl. den Artikel „Farbe"); denn im Falle stark absorbierender Körper ($\varkappa>1$) ergeben die Gleichungen der elektromagnetischen Lichttheorie in Verbindung mit den genannten Grenzbedingungen, daß die reflektierte Energie einer bestimmten Wellenlänge um so größer ist, je größer der betreffende Extinktionskoeffizient ist. Speziell folgt bei senkrechter Inzidenz für den reflektierten Bruchteil der auffallenden Energie (das „Reflexionsvermögen")

$$R = \frac{n^2 + \varkappa^2 + 1 - 2n}{n^2 + \varkappa^2 + 1 + 2n}$$

(vgl. die Artikel „Lichtreflexion" S. 353ff. und „Lichtpolarisation" S. 319), so daß R seinem Maximalwert 1 um so näher kommt, je kleiner 2 n gegen $n^2 + \varkappa^2 + 1$ ist, also bei mittleren Werten von n (2 bis 3), je größer $\varkappa$ gegen n ist. Mithin fallen die Wellenlängengebiete starker Extinktion und starker Reflexion zusammen (vgl. Figur 2, S. 813; jedoch ist das Maximum der Reflexion gegen dasjenige der Extinktion nach kürzeren Wellenlängen hin verschoben). So ergibt sich die ihrer Absorption entsprechende starke Reflexion der Metalle. Da z. B. Gold oder Kupfer Rot stärker als Blau absorbieren, erscheint weißes Licht, an Gold oder Kupferflächen reflektiert, rötlich, und zwar um so intensiver rot, je öfter das Licht an ihnen reflektiert wird. Auf diesem Prinzip beruht die Rubenssche Methode der Erzeugung von Reststrahlen: die Isolierung langwelliger „Wärmestrahlen" durch mehrfache Reflexion der Strahlung eines Auerstrumpfes an selektiv im Ultrarot absorbierenden Kristallflächen (vgl. die Artikel „Lichtreflexion" S. 356ff. und „Infrarot").

Von besonderem Interesse sind Polarisationsänderungen, die bei Reflexion polarisierten Lichtes an stark magnetischen Metallspiegeln auftreten („magnetischer Kerreffekt"). Diese Erscheinungen hängen aufs innigste mit den Einwirkungen zusammen, die ein Magnetfeld auf das in den Körpern fortschreitende Licht ausübt, und ihre Theorie folgt ohne weiteres aus der Elektronentheorie des Faraday- und Zeemaneffektes, weshalb Näheres hierüber im Artikel „Magnetooptik" besprochen wird.

4. Umformung in elektrische und in chemische Energie. Der elektromagnetischen Natur der Strahlung entsprechend ist anzunehmen, daß vielleicht bei jeder Umformung von Strahlung primär elektrische Energie entsteht, nämlich Bewegungen gebundener oder freier Elektronen.

Unmittelbar in die Erscheinung tritt diese Umformung in elektrische Energie beim experimentellen Nachweis elektrischer Wellen: in den „Hertzschen Resonatoren“ — das sind kreisförmige oder rechteckige Drahtstücke, die einen bis auf Bruchteile eines Millimeters geschlossenen Stromkreis bilden — rufen die periodischen elektrischen und magnetischen Kräfte des „Erregers“ durch Resonanz elektrische Schwingungen hervor, die sich durch Fünkchen an der Unterbrechungsstelle bemerkbar machen; die „Kohärer“, die „Thermodetektoren“ und die anderen „Detektoren“, die in der modernen drahtlosen Telegraphie als Empfangsapparate dienen, ändern beim Auftreffen von Wellen ihren elektrischen Widerstand bezw. erwärmen sich oder wirken als Gleichrichter und verwandeln dadurch die Schwingungen in leicht nachweis- und meßbare Gleichströme. Die Theorie jener Resonanzschwingungen findet sich im Artikel „Schwingungen. Elektrische Schwingungen“, ebenso die Beschreibung dieser Apparate und Anordnungen.

Die Umformung von kurzen Lichtwellen in elektrische Energie ist ebenfalls von Hertz gelegentlich derselben Untersuchungen über die „Ausbreitung der elektrischen Kraft“ beobachtet worden, nämlich die Beeinflussung des Funkenüberganges zwischen Metallelektroden durch Bestrahlung der Funkenstrecke mit dem Licht eines anderen Funkens. Das Gebiet der sich an diese Hertzsche Entdeckung anschließenden Untersuchungen ist im Artikel „Lichtelektrische Erscheinungen“ besprochen. Aus den vorliegenden Beobachtungen läßt sich mit großer Wahrscheinlichkeit schließen, daß alle lichtelektrischen Wirkungen — nicht nur die an Metallen (Lenard) sondern auch die an Isolatoren, Flüssigkeiten und Gasen — auf Elektronenmission beruhen. So ist dies kürzlich von Rieß auch für das Selen erwiesen worden, dessen große Widerstandsabnahme bei Belichtung sogar seine technische Verwendung zur Messung von Lichthelligkeit ermöglicht hat („Selenzelle“). Analog den Lichtstrahlen bewirken die Röntgenstrahlen ebenfalls bei ihrem Auftreffen auf Metalle eine Aussendung von Elektronen (vgl. den Artikel „Röntgenstrahlen“). Während deren Geschwindigkeit aber von etwa gleicher Größe ist wie die der primären, die Röntgenstrahlen erzeugenden Kathodenstrahlen (rund „10000 Volt“), ist die Geschwindigkeit der von violettem Licht an Metallen im Vakuum erzeugten Elektronen etwa 10^8 cm/sec — entsprechend wenigen Volt beschleunigender Spannung. Für eine Theorie der Erscheinungen sind die folgenden — vor allem von Lenard und von E. Ladenburg gefundenen — Tatsachen als die wichtigsten der bisher bekannten hervorzuheben: daß die Geschwindigkeit der Elektronen durchaus unabhängig von der benutzten Lichtintensität und von der Temperatur ist, dagegen merklich zunimmt mit abnehmender Wellenlänge (zunehmender Frequenz) des Lichtes; daß die Elektronenmenge der absorbierten Lichtintensität proportiona ist und im allgemeinen mit abnehmender Wellenlänge des wirkenden Lichtes zunimmt, und daß (nach neuen Untersuchungen von Joffé und E. Meyer) bei Belichtung genügend kleiner Teilchen bis zur Abspaltung eines Elektrons relativ lange Zeiten (eventuell mehrere Minuten) vergehen, die aber trotz gleicher Bedingungen stark variieren und den Zufallsgesetzen unterworfen sind. Neben diesem normalen Effekt haben Pohl und Pringsheim an Alkali- und einigen Erdalkalimetallen einen ausgesprochenen elektiven Effekt beobachtet, der im Artikel „Lichtelektrische Erscheinungen“ beschrieben ist.

Eine vollständige „Erklärung“ aller beobachteten Erscheinungen des normalen Effektes ist zur Zeit noch nicht gelungen. Lenard hat (1902) die bisher nicht weiter ausgearbeitete Hypothese aufgestellt, daß der Vorgang zwar ein Resonanzphänomen sei, daß aber die Elektronen, nur durch Aufnahme eines Bruchteils der Lichtenergie „ausgelöst“ das Metall mit einer Geschwindigkeit verlassen, die von der Größe der bindenden Atomkräfte abhängt. Unerklärt bleibt hierbei die Abhängigkeit der Elektronengeschwindigkeit von der Wellenlänge.

Andererseits hat die Einsteinsche „Quantenhypothese“ — eine Weiterbildung der Planckschen Hypothese des „elementaren Wirkungsquantums“ —, die jenen Einfluß der Wellenlänge erklärt, in ihrer ursprünglichen, revolutionären Form wenig Anhänger gefunden. Zur Ableitung des Strahlungsgesetzes (s. d.) des schwarzen Körpers führte nämlich Planck (1900) die Annahme ein, daß im Zustande stationären Strahlungsgleichgewichtes der Austausch von Energie zwischen Resonator und Strahlung nur in ganzen Vielfachen des sog. „Energiequantums“ ε erfolgt. Und zwar ist ε proportional der Schwingungszahl N des Resonators, $\varepsilon = hN$, wo $h = 6.415 \cdot 10^{-27}$ erg. sec. das „elementare Wirkungsquantum“ genannt wird. Den Grundgedanken dieser Hypothese hat nun besonders Einstein (1905) zu einer „Lichtquantenhypothese“ umgeformt, indem er sich das Licht selbst als aus Quanten $\varepsilon = hN$ bestehend vorstellt, um sie in allen Fragen der Erzeugung oder Umformung von Strahlung anzuwenden. In allen diesen Fällen sollen also nur ganze

Vielfache von ε — am häufigsten ein einziges Quantum — absorbiert und in andere Energie umgewandelt werden. Der neueren Formulierung der Planckschen Hypothese (1912) würde die weniger revolutionäre Annahme entsprechen, daß nicht nur die Strahlungsenergie, sondern allgemein die Abgabe irgendwelcher Energie nur in solchen Momenten erfolgt, in denen die Energie des emittierenden Teilchens gleich einem ganzen Vielfachen von ε ist, während die Aufnahme (Absorption) von Energie gemäß der Dispersionstheorie (s. o.) stetig vor sich geht; und zwar müßten bei einem Emissionsvorgang stets die ganze vorhandene Energie, also nur Vielfache von ε ausgegeben werden. Beim lichtelektrischen Effekt speziell ist nach dieser Vorstellung anzunehmen, daß ein Resonator der Schwingungszahl N nur Licht der gleichen Schwingungszahl absorbiert, und daß er, wenn seine Energie den Betrag $\varepsilon = hN$ erreicht hat, die gesamte Energie ε in Gestalt lebendiger Kraft eines losgelösten Elektrons abgibt, so daß zwischen dessen Geschwindigkeit v bzw. dem in Volt in gemessenen Potential V, das das Elektron gerade zurückzuhalten vermag, und der Schwingungszahl N des wirkenden Lichtes die Gleichung besteht

$$hN = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{e}{300} V \qquad 12)$$

Nimmt man an, daß das Elektron beim Verlassen des Metalls eine Oberflächenkraft (die in Volt gemessen mit Φ bezeichnet werde) zu überwinden hat, so tritt an Stelle von V in Gleichung 12) $V + \Phi$ und v bezeichnet dann die Geschwindigkeit, die das Elektron außerhalb des Metalles besitzt. In der Tat liefert obige Gleichung (mit $\Phi = 0$) bei $\lambda = 300\ \mu\mu$ für V die richtige Größenordnung von 6 Volt. Zugleich ergibt sich ungezwungen die Unabhängigkeit dieser Geschwindigkeit von Lichtintensität und Temperatur und die mit N wachsende Geschwindigkeit (ob entsprechend Gleichung 12) N und V einander proportional sind, ist experimentell noch unentschieden). Außerdem folgt nach jener Gleichung im Falle der Röntgenstrahlen aus der beobachteten Geschwindigkeit von „10000 Volt" eine „Wellenlänge" der Röntgenstrahlen von etwa 10^{-9} cm, entsprechend den heutigen Ansichten über die Größenordnung ihrer „Impulsbreite" (vgl. den Artikel „Röntgenstrahlen"). Jedoch findet bei dieser Hypothese die nach statistischen Gesetzen erfolgende Abgabe von Elektronen keine Erklärung.

Höchst einfach folgt aus der ursprünglichen Einsteinschen Hypothese die Stokessche Regel der Fluoreszenz: da nämlich die von einem Molekül emittierte Energie nicht größer als die absorbierte, ihr höchstens gleich sein kann, ergibt sich $hN_a \geq hN_e$, wobei der Index a die absorbierte, der Index e die emittierte Schwingungszahl bezeichnen soll, also $\lambda_e \geq \lambda_a$, entsprechend der Stokesschen Regel (s. oben).

Auch zum Verständnis der chemischen Wirkungen des Lichtes (vgl. den Artikel „Photochemie") hat sich die Quantenhypothese als nützlich erwiesen (Einstein, Stark). Die im allgemeinen größere Wirksamkeit kurzwelligen Lichtes — ultrarotes Licht übt im Gegensatz zu ultraviolettem höchst selten chemische Wirkungen aus — beruht hiernach darauf, daß das Energieelement ε, das ja die absorbierte, zur Umformung verfügbare Energie darstellt, mit abnehmender Wellenlänge wächst. Andererseits hat kürzlich (1912) Einstein ohne Quantenhypothese, auf wesentlich thermodynamischer Grundlage und unter plausiblen Annahmen über die Zerfallgeschwindigkeit eines Moleküls unter dem Einfluß von Licht das „photochemische Aequivalentgesetz" abgeleitet, nach welchem die beim Zerfall eines Moleküls infolge Strahlung der Schwingungszahl N absorbierte Energie gleich hN ist. Im allgemeinen ist allerdings ein größerer Frequenzbereich wirksam, so daß die wirklichen Erscheinungen nicht so einfach sind, wie dies Gesetz verlangt.

Das einzig allgemeine Gesetz bei photochemischen Prozessen ist die von Gotthus (1818) und Draper (1842) ausgesprochene Tatsache, daß nur das absorbierte Licht chemisch wirksam ist. Im günstigsten Falle (Kohlensäureassimilation der Pflanze) sollen bis 98% des absorbierten Lichtes in chemische Energie umgeformt werden (Brown, Weigert), im allgemeinen jedoch geht ein großer Teil des absorbierten Lichtes in Wärme über. Die Ansicht, daß Elektronen („Valenzelektronen") und ihre Loslösung vom bezw. Vereinigung mit dem Atom eine wesentliche Rolle beim Zustandekommen der chemischen Wirkung spielen, wird wohl immer mehr und mehr anerkannt. So sind lichtelektrische Erscheinungen im Zusammenhang mit photochemischen Vorgängen zu erwarten und verschiedentlich beobachtet (Becquerel-Effekt an chlorierten oder jodierten Silberplatten (vgl. den Artikel „Photochemie"), und es wird angenommen, daß unter dem Einfluß des Lichtes eine bestimmte Anzahl von Molekeln, die der Lichtstärke und der Beleuchtungsfläche proportional ist, verändert wird, indem sie negative Elektronen verliert. Von einer allgemeinen Theorie der photochemischen Prozesse kann zurzeit jedoch keine Rede sein, versteht man doch unter ihnen auch die physiologischen und photodynamischen Lichtwirkungen, die Erscheinungen der Polarisation und das große Gebiet der photographischen Prozesse.

Literatur. *Zusammenhängende Darstellungen:* **P. Drude**, *Lehrbuch der Optik, 3. Aufl. Leipzig 1912.* — **Derselbe**, *Physik des Aethers, 2. Aufl., 1912.* — **H. A. Lorentz**, *The Theory of Electrons. Leipzig 1909.* — **M. Abraham**, *Theorie der Elektrizität,* II. *Bd., 2. Aufl. Leipzig 1911.* — **W. Voigt**, *Magneto- und Elektrooptik. Leipzig 1908.* — **M. Planck**, *Theorie der Wärmestrahlung. Leipzig 1906.* — **H. Hertz**, *Ausbreitung der elektrischen Kraft. Leipzig 1892.* — **A. Schuster**, *Theoretische Optik, deutsch von H. Konen. Leipzig 1907.* — **Müller-Pouillets** *Lehrbuch der Physik,* II. *Bd. (Optik von O. Lummer). Braunschweig 1909.* — **H. Kayser**, *Handbuch der Spektroskopie, Bd.* IV. *Leipzig 1908. (Dispersion bearbeitet von A. Pflüger, vollständige Literatur bis 1908, Fluoreszenz und Phosphoreszenz von H. Konen.)* — **R. W. Wood**, *Physical optics, new ed. New York 1911.* — **D. A. Goldhammer**, *Dispersion und Absorption des Lichtes, Leipzig u. Berlin 1903.*

Abhandlungen: Zu 2*a:* **O. E. Meyer**, *Pogg. Ann.* 145, *80, 1872.* — **H. Helmholtz**, *Ebenda,* 154 *582, 1875.* — **Derselbe**, *Berl. Akademieber. 1903, 1093.* — **H. A. Lorentz**, *K. Akad. von Wet. to Amst. VI, 506, 555, 1897/98; IV, 518, 577, 1905/06.*

Zu 2*b:* **E. Hagen und H. Rubens**, *Ber. Berliner Ak. 1902 bis 1910.* — **P. Drude**, *Phys. Zeitschr.* 1, *165, 1900.* — **E. Cohn**, *Wied. Ann.* 38, *217, 1889.* — **W. Voigt**, *Phys. Zeitschr.* 2, *302, 1901.* — **H. A. Lorentz**, *Amst. Proc. 1903, 666.*

Zu 3*a:* **Lord Rayleigh**, *Ges. Abh., Bd.* III *u.* IV. — **W. Goethe**, *Farbenlehre, didakt., T.* X, *§§ 145 bis 172.* — **A. Schuster**, *Astroph. J.* 21, *1905.* — **M. v. Smoluchowski**, *Ann. (4), 25, 216, 1908.* — **Chr. Soret**, *Arch. de sciences phys. et nat.* 35, *54, 1869.* — **O. von und zu Aufsess**, *Ann. (4),* 13, *678, 1904.*

Zu 3*b:* **H. Hertz**, *Wied. Ann.* 36, *1, 1889.* — **M. Planck**, *Ber. Berliner Ak. 1902, 470; 1903, 480; 1904, 740; 1905, 382.*

Zu 3*c:* **R. W. Wood**, *Phys. Zeitschr.* 13, *353, 1912.*

Zu 3*d:* **F. Pockels**, *Phys. Zeitschr.* 5, *152, 1904.* — **G. Mie**, *Ann. (4),* 25, *377, 1908.* — **R. Gans** *und* **H. Happel**, *Ann. (4),* 29, *277, 1909.* — **P. Debye**, *Ann. (4),* 30, *57, 1909.*

Zu 4*: Literatur s. Bericht v.* **R. Ladenburg**, *Jahrb. d. Rad. u. El.* 6, *425, 1909.* — **Chr. Riess**, *Phys. Zeitschr.* 12, *480, 511, 1911.* — **F. A. Lindemann**, *Verh. d. D. phys. Ges.* 13, *482, 1911.* — **J. Stark**, *Jahrb. d. Rad. u. El.* 6, *12, 1909.* — **A. Einstein**, *Ann. (4),* 37, *832;* 38, *882, 1912.* — *Lit. über Photochemie s. Bericht v.* **F. Weigert**, *Chem. u. chem. techn. Vorträge. Stuttgart 1911.*

R. Ladenburg.

Stratigraphie.

Die Stratigraphie (Schichtkunde, Formationskunde) ist derjenige Zweig der geologischen Wissenschaft, der die Schichten der Sedimentgesteine und zwar namentlich ihren Fossilgehalt und ihre Aufeinanderfolge erforscht Sie liefert die geologische Zeitrechnung, indem sie aus der Vergleichung der lokalen Schichtfolgen eine allgemein-regionale, für die ganze Erde gültige Schicht- und Formationsfolge aufstellt, auf die die Angaben des geologischen Alters der Schichten bezogen werden. Indem die Stratigraphie ferner die petrographische Beschaffenheit der Schichtgesteine erforscht, vermag sie Schlüsse auf die physikalischen Verhältnisse in dem Bildungsraum zur Zeit ihrer Ablagerung zu ziehen, z. B. auf das Bildungsmedium, Facies, Meerestiefe, Lebensbedingungen, klimatische Verhältnisse. Die Vergleichung der Schichten, ihre Parallelisierung und Altersbestimmung gründet sich nicht auf die Gesteinsbeschaffenheit, sondern auf die Reste der vorweltlichen Lebewesen, deren es in jeder geologischen Periode wieder andere gab und von denen diejenigen den größten Wert als Leitfossilien haben, die eine geringe vertikale und eine große horizontale Verbreitung haben. Die Stratigraphie weist die geographische Verbreitung der vorweltlichen Lebewesen nach, sie erkennt ferner die erdgeschichtliche Bedeutung der Lücken in den Schichtfolgen und der diskordanten Lagerungen, in denen sich die Trans- und Regressionserscheinungen der Meere und die gebirgsbildenden Vorgänge offenbaren. Sie ist also die wichtigste Hilfswissenschaft einerseits für die Paläogeographie, d. h. die Rekonstruktion der vorweltlichen Meere und Landmassen, andererseits für die Erdgeschichte überhaupt. Mit der letzteren darf sie allerdings nicht identifiziert werden; denn die vulkanischen Ereignisse, die Geschichte der Tier- und Pflanzenwelt, die geomorphologischen Daten der anorganischen Entwickelungsgeschichte gehören wohl der Erdgeschichte, nicht aber der Stratigraphie an. Die Stratigraphie ist Urkundenlehre, die Erdgeschichte (historische Geologie) aber Geschichtsschreibung. Hilfswissenschaften der Stratigraphie sind die übrigen Zweige der Geologie, die Paläontologie, ferner Petrographie, Geographie, Ozeanographie, Klimatologie. Sie selbst ist Hilfswissenschaft der Geologie, und zwar namentlich der historischen und tektonischen, ferner der Petrographie, sowie auch der Prähistorie.

Literatur. *Lethaea geognostica. Herausgegeben von F. Roemer und F. Frech, seit 1876.* — **E. Kayser**, *Formationskunde. 5. Aufl. 1913.* — **E. Haug**, *Traité de Géologie II, 1908/11.* — **A. de Lapparent**, *Traité de Géologie, 5. Aufl., 1905.* — *Handbuch der regionalen Geologie. Herausgegeben von G. Steinmann und O. Wilckens, seit 1910.* — *Die meisten geologischen Zeitschriften (vgl. den Artikel „Geologie“).*

Otto Wilckens.

Strecker

Adolf.

Geboren am 21. Oktober 1822 in Darmstadt, gestorben am 7. November 1871 in Würzburg. Er ist aus der Schule Liebigs, dessen Assistent er war, hervorgegangen. Zuerst Privatdozent in Gießen (1848), dann Professor der Chemie in Christiania (1851), in Tübingen (1860), Würzburg (1870), hat er als Lehrer wie als Forscher Bedeutendes geleistet. Als vorzüglicher Beobachter und Experimentator hat er besonders die organische Chemie mit wichtigsten Tatsachen bereichert. Seine Untersuchungen erstrecken sich auf sehr mannigfaltige Gebiete, z. B. auf Amino- und Oxysäuren, Harnsäurederivate, Gallensäuren, Pflanzenstoffe verschiedenster Art, Diazoverbindungen, Sulfonsäuren u. a. m. und haben häufig zur Aufklärung schwieriger Fragen gedient.

Sein Lehrbuch der anorganischen und der organischen Chemie, auf Grund des Regnaultschen frei bearbeitet, fand weite Verbreitung und erlebte zahlreiche Auflagen. Eine Zeitlang gab Strecker den Liebigschen Jahresbericht der Chemie heraus. Seine Abhandlungen sind meist in Liebigs Annalen, zum Teil in der Zeitschrift für Chemie veröffentlicht.

E. von Meyer.

Stroboskopische Methoden.

1. Geschichtliches und Grundformen. 2. Theorie. 3. Frequenzberechnung. 4. Methoden zur Untersuchung schnell ablaufender Vorgänge: a) Die graphische Methode. b) Die Querverschiebung. α) Der rotierende Spiegel. β) Das bewegte Objektiv. γ) Prismatische Ablenkung (auch durch Linsen). δ) Die photographische Trommel. c) Die Querschwingung. d) Die Momentphotographie. 5. Methoden der intermittierenden Untersuchung: a) Die rotierende Schlitzscheibe. b) Die Stimmgabel mit schwingender Blende. c) Flammen wechselnder Größe. d) Geißlerröhren. e) Der elektrische Funke. f) Der rotierende schmale Projektionsschirm. g) Untersuchung intermittierender Lichtquellen. h) Nichtoptische Methoden. 6. Der Kinematograph.

1. Geschichtliches und Grundformen. Die „stroboskopischen Scheiben oder Zauberscheiben", erfunden von Prof. Stampfer in Wien, wurden seit der Mitte des Jahres 1833 in Deutschland öffentlich verkauft; beigegeben war ihnen eine vom Erfinder verfaßte Erklärung. Fast genau gleichzeitig beschrieb Plateau ein auf demselben Prinzip beruhendes „Phänakistoskop" [1].[1])

Da der Stampfersche Apparat einen Hinweis auf die verschiedenen wichtigen Teile gestattet, sei er kurz beschrieben. Eine kreisrunde Scheibe besitzt in der Nähe des Umfanges eine Anzahl schmaler, radialer Spalten. Ferner enthält sie eine im Kreise angeordnete Reihe von Bildern eines Bewegungsvorganges, derart, daß jedes in der Anordnung folgende Bild die folgende Phase des Vorgangs darstellt. Die Zahl dieser Bilder stimmt im einfachsten Falle mit der Spaltzahl überein. Versetzt man die Scheibe in Drehung, so verschwimmt die Zeichnung bei unmittelbarer Betrachtung. Hält man aber den Apparat vor einen Spiegel, so gewinnt man die Möglichkeit, die Bildreihe durch die Spalte zu betrachten, und nunmehr sieht man die Figuren deutlich; die Phasen der Bewegung verschmelzen miteinander, so daß man den dargestellten Vorgang sich abspielen sieht.

Horner [2] konstruierte 1833 die noch heute als Spielzeug übliche „Wundertrommel", auch wohl Dädaleum genannt. Sie hat zylindrische Form. Die Spalten befinden sich der Achse parallel, in der Nähe des oberen Randes; die Figuren sind auf einem Papierstreifen angebracht, den man unten an die Innenwand der Trommel stellt.

Ein neues Prinzip legte Reynaud (1877) seinem „Praxinoskop" zugrunde. AB (Fig. 1)

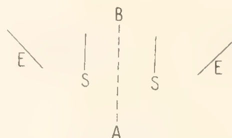


Fig. 1.

deutet eine Achse an, um die sich eine prismatische Trommel dreht, deren Wände SS Spiegel sind. Mit diesem — beispielsweise zwölffachen — Drehspiegel dreht sich ein Satz von Bildern EE. Diese Bilder liegen also auf der Innenfläche einer oben offenen abgestumpften Pyramide. Sieht man schräg von oben gegen die Spiegel, so erblickt man, wie bei den zuvor genannten Apparaten, jedes Bild nur kurze Zeit, nämlich nur bei günstiger Stellung des Spiegels. Es kommt aber als neue Eigenschaft hinzu, daß das Spiegelbild, solange es gesehen wird, ziemlich still steht, da es ja in der Nähe der Achse liegt. Wir haben also ein „optisch stationäres" Bild, während die früheren Apparate die Annäherung an den Stillstand des Bildes nur durch die geringe Dauer der Besichtigung bewirkten. Die heute üblichen Kinematographenapparate nähern sich demselben Ziel durch eine mechanisch diskontinuierlich gemachte Bewegung des Bildbandes, und erst die neueren Typen bewirken den

[1]) Die eingeklammerten Zahlen im Text beziehen sich auf die Literaturangaben am Schlusse des Artikels.

scheinbaren Stillstand der in Wirklichkeit kontinuierlichen Bewegung durch eine rein optische Vorrichtung (s. Abschnitt 6).

Die wichtigste Förderung wurde durch die Anwendung der Photographie zur Herstellung der Aufnahmen erzielt. Nach dieser Richtung arbeiteten mit Erfolg zuerst Muybridge (1877) in Amerika und Anschütz (1885) in Deutschland. Ihr Verfahren war jedoch umständlich, da sie zur Herstellung einer Reihe von Phasenbildern auch eine ebenso zahlreiche Reihe von photographischen Apparaten benötigten. Einen Apparat, der optisch nur eine einfache Kamera darstellt, dafür aber die photographische Platte in schneller Folge wechselt, dürfte zuerst der Astronom Janssen (1874) hergestellt haben; er benutzte eine ruckweise gedrehte kreisförmige Platte. Diese ersetzte Marey (1888) durch den heute üblichen Film und erzielte so die Möglichkeit, die Zahl der aneinandergereihten Aufnahmen unbeschränkt zu steigern.

In den physikalischen Laboratorien wurde gleichzeitig die stroboskopische Methode in den verschiedensten Formen angewendet, teils zur unmittelbaren Beobachtung von Bewegungen, teils zu ihrer photographischen Fixierung. Das Prinzip dieser Untersuchungsmethode ist bereits von Plateau klar ausgesprochen und benutzt worden [3 u. 4].

Weiterhin haben von dieser Methode Gebrauch gemacht Doppler [5], Mach [4], Töpler [6], Savart, Helmholtz u. a.

2. Theorie. Wir nennen Beobachtungsfrequenz die Zahl der in einer Sekunde erfolgenden Beobachtungen, also z. B. die Zahl der pro Sekunde am Auge vorübergehenden Spalten. Bei periodischen Bewegungen bezeichnen wir ferner die Zahl der auf eine Sekunde entfallenden Perioden in üblicher Weise als Frequenz (genauer Vorgangsfrequenz). Stimmen beide Zahlen überein, so glaubt man den in Wirklichkeit bewegten Gegenstand stillstehend zu sehen. Bereits von den ersten Autoren wurde dies dadurch erklärt, daß im Falle jener Uebereinstimmung „das Auge den Gegenstand nur in identischen Stellungen sehen kann, und daß sich deshalb der Anschein eines vollkommen unbeweglichen Gegenstandes ergeben muß, wenn die Spalten mit einer Schnelligkeit aufeinander folgen, die zur Verschmelzung der Netzhautbilder genügt" (Plateau l. c.). Diese auf der Dauer des Lichteindrucks im Auge beruhende Erklärung ist auch heute noch die übliche. Nach neueren Untersuchungen, vornehmlich solchen von P. Linke (Jenaer Habilitationsschrift 1907; vgl. auch [7, S. 16]), handelt es sich aber um ein vorwiegend psychisches Problem, um eine „Identifikationstäuschung", die durch den physiologischen Vorgang der Verschmelzung zwar gefördert wird, aber auch ohne ihn möglich ist. Bedingung für ihr Zustandekommen ist, daß „mindestens zwei Gesichtswahrnehmungen nacheinander bestehen, die in ihren räumlichen Bestimmungen wenig genug voneinander abweichen, um identifiziert, d. h. auf einen einzigen Gegenstand bezogen werden zu können". Ferner aber „muß diese Identität oder Einheit unmittelbar erlebt werden, und dazu ist nötig, daß diese beiden fraglichen Wahrnehmungen rasch genug aufeinander folgen, um als ein einziges, einheitliches Ganzes im Bewußtsein zu wirken. Die zweite darf nicht etwa die erste durch einen Erinnerungsvorgang reproduzieren, sondern beide müssen gleichzeitig im Bewußtsein vorhanden sein, etwa in dem Sinne, in welchem dies vom gesprochenen Wort oder einer kurzen Reihe von Taktschlägen oder den Tönen einer Melodie ebenfalls behauptet werden muß."

Für den oben besprochenen Fall des scheinbaren Stillstehens bei Uebereinstimmung von Beobachtungs- und Vorgangsfrequenz tritt die Bedeutung dieses theoretischen Unterschiedes der beiden Auffassungen weniger hervor; wohl aber bei dem Fall der nur angenäherten Uebereinstimmung von Beobachtungs- und Vorgangsfrequenz. Man sieht dann bei jeder folgenden Beobachtung den bewegten Gegenstand an einer anderen Stelle, die aber der vorangehenden benachbart ist. Auch jetzt identifizieren wir die gesehenen Bilder. Aber „Identität des räumlich Unterschiedenen ist nicht vorstellbar ohne den Gedanken an Bewegung oder das Bestehen von Zwischenphasen". Wir glauben demnach den Gegenstand von der ersten nach der zweiten Stelle usw. wandern zu sehen, und zwar in der Zeit zwischen zwei Beobachtungen. Scheinbar legt also der Gegenstand während einer Beobachtungsperiode nur ein kleines Stück der dem ganzen Vorgang entsprechenden Strecke zurück; in Wirklichkeit sehr nahe diese Strecke selbst. Es wird also die schnelle periodische Bewegung durch Verbindung mit einer schnellen periodischen Beobachtung scheinbar verlangsamt und dadurch der Beobachtung zugänglich. Dies kann man als das eigentliche stroboskopische Prinzip bezeichnen. Die „Beobachtung" braucht dabei nicht notwendig auf optischem Wege zu erfolgen, sondern wir können auch die später (Abschnitt 5h) zu besprechenden mechanischen und elektrischen Methoden hierher rechnen.

Daß die Identifikation bei jener scheinbaren Bewegung nicht dasselbe ist wie die Verschmelzung wird (l. c.) damit begründet, daß die Verschiedenheit der Bilder

und ihr zeitlicher Abstand recht groß sein können, und daß ein deutliches Bemerktwerden der Zwischenpause den Eindruck der Bewegung nicht hindert.

Allerdings hat man in solchen Fällen den Eindruck eines sprungweisen Uebergangs aus der einen Situation in die andere. Dies kann besonders bei kinematographischer Projektion störend wirken, wenn ein bewegter Gegenstand in zu großen Pausen aufgenommen und reproduziert wird.

Ein anderes, dem vorhergehenden nahestehendes Phänomen tritt auf, wenn bei einem schnell bewegten Gegenstand die Pausen zwischen den Aufnahmen, nicht absolut, aber relativ groß sind. Man glaubt dann mehrere Bilder gleichzeitig, den Gegenstand also vervielfacht zu sehen. Ein Beispiel hierfür bildet das Bild eines schnell geschwungenen Stockes, den man im Licht einer Wechselstrombogenlampe betrachtet. Erscheinungen dieser Art erklären sich unschwer durch das gleichzeitige Vorhandensein von Nachbildern und neuem Bild auf der Netzhaut.

Die äußere Bedingung, unter der eine solche Auflösung in einzelne Bilder erfolgt, ist: Es muß der Gegenstand während der Dunkelpause eine Strecke zurücklegen, die größer ist als seine Länge, gemessen in der Bewegungsrichtung.

Sehen wir von diesen besonderen Fällen ab, so glauben wir eine Bewegung zu sehen, wenn die Lage eines Gegenstandes auf jedem folgenden Bild von der auf dem vorhergehenden nicht zu verschieden ist. Hierbei können eigentümliche Täuschungen auftreten, z. B. dann, wenn ein Rad mit vier Speichen sich während jeder Periode um je 80° dreht. Es liegt dann auf jedem Bild eine Speiche um 10° rückwärts gegen die Lage, in der auf dem vorigen Bild eine andere Speiche lag. Da alle Speichen gleich aussehen, identifizieren wir nun die nahe zusammenliegenden, glauben also eine Rückwärtsbewegung zu sehen. Nach Lehmann [7 S. 42] gibt es hier ein dem physikalischen vergleichbares psychologisches „Prinzip des kürzesten Weges", durch das die Identifikation im allgemeinen zwangläufig bestimmt wird.

Wir kehren zu dem Vorgang der Verschmelzung von Nachbild und Bild zurück. Es ist, wenn auch nicht für das Bewegungsehen, so doch für das Verschwinden des Flimmerns von Bedeutung. Die kleinste Frequenz, bei der sich ein kontinuierlicher Eindruck ergibt, heißt Verschmelzungsfrequenz. Sie ist abhängig von der Lichtstärke und von dem Verhältnis der Hellzeit zur Dunkelzeit.

Diese letztere Größe wollen wir das Sektorenverhältnis nennen, indem wir an den besonderen Fall der rotierenden Scheibe mit abwechselnd durchsichtigen und undurchsichtigen Sektoren denken.

Zur Erläuterung der ersteren Abhängigkeit mögen einige Zahlen dienen, die Lehmann auf Grund von Versuchen von M. A. Porter berechnet hat, die aber hier auf Hefnerkerzen umgerechnet sind (1 Meterkerze ist also die Beleuchtungsstärke in 1 m Abstand von 1 HK). Zu den Logarithmen ist zur Vermeidung negativer Zahlen 10 addiert. Für das Sektorenverhältnis ist der Wert 1 angenommen.

10 + log J	J in Meterkerzen	n = Verschmelzungsfrequenz
8,80	0,063	17.75
9,08	0.12	18,10
9.42	0,26	18,50
10,20	1,05	25,08
11.42	26,00	42,66
12,20	105	50,83

Man sieht hieraus, daß die zur Verschmelzung notwendige Frequenz mit der Lichtstärke wächst; der Zuwachs ist aber nicht dieser Größe selbst, sondern deren Logarithmus proportional. Er steigt demnach langsamer als die Lichtstärke, nämlich in arithmetischer Progression, wenn diese in geometrischer wächst. Dabei ist die Abhängigkeit für die beiden Bereiche oberhalb und unterhalb einer Beleuchtungsstärke von etwa $^1/_4$ Meterkerze verschieden, was sich durch einen Knick der Kurve (Fig. 2) kundgibt; diese

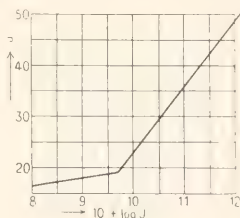


Fig. 2.

besteht demnach aus zwei geraden Linien. Dieser Sprung hängt nach der Theorie von v. Kries mit der Tatsache zusammen, daß der zum Sehen bei schwacher Helligkeit dienende Apparat unserer Netzhaut, die Stäbchen, eine geringere Fähigkeit zeitlicher Unterscheidung hat als der bei größerer Helligkeit in Funktion tretende Apparat, die Zapfen.

Die Abhängigkeit der Verschmelzungsfrequenz vom Sektorenverhältnis ist bereits

Helmholtz aufgefallen (Handb. d. phys. Opt. II. Aufl. S. 489); es ist neuerdings von Marbe [8] untersucht worden. Es ergibt sich, daß die zur Verschmelzung nötige Frequenz am höchsten ist, wenn man das Sektorenverhältnis gleich der Einheit wählt. Bei der stroboskopischen Betrachtung physikalischer Vorgänge ist es in der Regel erheblich kleiner, bei kinematographischer Projektion größer als 1. In beiden Fällen verringert sich die Verschmelzungsfrequenz gegenüber den in obiger Tabelle und Kurve angegebenen Werten, die sich auf das Sektorenverhäktnis 1:1 beziehen. Besteht z. B. beim Kinematographen ein Verhältnis 7:1 zwischen der Dauer der Projektion und der dunkler für den Bildtransport nötigen Zwischenpause, so beträgt — unter gewissen Annahmen [7 S. 33] — die Verschmelzungsfrequenz nur etwa zwei Drittel jener Normalwerte. Daß man derartige Verhältnisse anstrebt (vgl. Abschnitt 6), hat also nicht nur seine Berechtigung wegen der auf diese Weise zu erzielenden größeren Lichtstärke.

3. Frequenzberechnung. Bezeichnet n die Vorgangsfrequenz, m die Beobachtungsfrequenz, so erhält man einen scheinbaren Stillstand des periodischen Vorgangs, wenn

$$m = n.$$

Die Zahl m wird in der Regel direkt bestimmt werden können, nach einer der unter 4 angegebenen Methoden.

Ein Stillstand ergibt sich aber auch, wenn man statt unmittelbar aufeinanderfolgender Bilder immer nur jedes zweite, dritte — allgemein jedes pte Bild beobachtet; also ist die obige Bedingung für den Stillstand zwar hinreichend, notwendig hingegen muß die Gleichung erfüllt sein:

$$m . p = n,$$

wobei p eine ganze Zahl, die Ordnungszahl ist. Um Aufschluß über p zu erhalten, verfährt man folgendermaßen. Man reguliert den Beobachtungsapparat (oder auch den Vorgang) bis scheinbarer Stillstand eintritt, also $m . p = n$ ist. Dann verlangsamt man seinen Lauf vorsichtig, bis bei einer Beobachtungsfrequenz m′ wiederum Stillstand auftritt.

Jetzt ist $m' . (p + 1) = n$. Aus beiden Gleichungen kann man die Ordnungszahl p eliminieren und erhält

$$n = \frac{m - m'}{m . m'}.$$

Kohlrausch empfiehlt, zur Vermeidung von Irrtümern, die Einregulierung nur unvollständig zu machen. Statt des Stillstandes verbleibt dann eine langsame Bewegung. Vollzieht sich diese in t sec s mal, so tritt an Stelle der Gleichung $n = m$ die andere $n = m \pm s/t$, und zwar gilt das + Zeichen, wenn bei einer Verringerung von m die scheinbare Bewegung schneller wird und umgekehrt.

Es kann auch der umgekehrte Fall vorkommen, daß m ein vielfaches, z. B. ein q-faches von n ist. Man sieht dann statt eines einfachen Bildes q Phasen des Vorganges. Sie liegen um je 1/q der ganzen Periode auseinander und der sich so ergebende Anblick oder ein entsprechendes Photogramm kann somit Aufschluß über den Ablauf der Erscheinung innerhalb einer Periode geben.

4. Methoden zur Untersuchung schnell ablaufender Vorgänge. Diese Methoden sind zwar in ihrer besonderen Ausführungsweise oft recht verschieden von dem stroboskopischen Verfahren; aber fast alle lassen sich auch so gestalten, daß sie wichtige Unterstützung von ihm finden oder ihm gewähren. Deshalb ist eine kurze Betrachtung nötig.

4a) Die graphische Methode. Bei ihr werden feine Schreibspitzen an dem zu untersuchenden Gegenstand befestigt, die dann auf berußte Walzen oder dgl. eine Kurve zeichnen. Das Verfahren gewährt den Vorteil, eine nachträgliche messende Auswertung zu gestatten; es ist beschränkt auf Körper, deren Masse groß genug ist, um durch die Reibung des Schreibstiftes nur eine relativ geringe Beeinträchtigung der Bewegung zu erfahren. Anwendungen des stroboskopischen Prinzips hierbei Abschnitt 5h.

4b) Die Querverschiebung. *α*) Der rotierende Spiegel bildet die älteste und wichtigste der hierhergehörigen Vorrichtungen. Bekanntlich werden durch ihn zeitlich aufeinanderfolgende Zustände räumlich nebeneinander gelegt und dadurch unterscheidbar. Jedes derartig wirkende Verfahren wollen wir Querverschiebung nennen. Das stroboskopische Prinzip kann hierbei zur Anwendung kommen, wenn ein periodischer Vorgang betrachtet wird, und wenn die Umdrehungszeit des Spiegels in ganzzahligem Verhältnis zu der Periode steht. Man erhält dann ein stillstehendes Bild (vgl. die unten angeführten Beispiele). Abgesehen hiervon läßt ein Vergleich des Verfahrens mit dem stroboskopischen folgende Vorteile des Spiegels erkennen; Seine Anwendung ist noch vielseitiger und meist auch bequemer. Ferner kann man den Spiegel fast beliebig schnell rotieren lassen; Boas konstruiert besondere Motoren mit großem, also lichtstarkem Spiegel, der bis zu 200 Touren pro sec macht. Man erhält dann eine weitgehende Auflösung. Endlich gestattet der Spiegel, besonders bei Heranziehung der Photographie, die zahlenmäßige Bestimmung zeitlicher Intervalle auf Grund der räumlichen. Nachteile:

Die Anwendung ist im wesentlichen auf Vorgänge beschränkt, die sich in einer Linie abspielen; quer zu dieser wird das Bild verschoben. Erstreckt sich aber die Erscheinung auch in der Bewegungsrichtung, so bekommt man ihre Form nie zu sehen. Beispiele: Man vergleiche die bekannten Kurven, die singende Flammen bei Anwendung des Spiegels ergeben, mit den Bildern der Töplerschen Abhandlung. Ferner: Eine schwingende Saite sieht man bei stroboskopischer Betrachtung z. B. mit Hilfe der Schlitzscheibe (Abschnitt 5a) als Ganzes, je nach Wunsch in beliebiger Phase. Bei Betrachtung mit dem Drehspiegel muß man einen Punkt der Saite isolieren, erhält aber für diesen das auseinandergebreitete Bild aller Phasen. Das Herausgreifen des betreffenden Punktes kann in der Weise erfolgen, daß man nach Helmholtz ein kleines weißes Partikelchen, z. B. ein Stärkekörnchen auf der Saite anbringt und hell beleuchtet. Oder man entwirft von ihr ein Bild und stellt in dessen Schwingungsebene eine Blende mit einem zur Saitenrichtung senkrechten Spalt auf; bildet man nun wiederum den Spalt ab, so erhält man in seinem Bild einen schwarzen Punkt (Raps und Krigar-Menzel, Ann. d. Phys. 44 [1891] 623 und 50 [1893] 444).

Sehr wichtig ist die Umkehrbarkeit des Verfahrens: Bewegt sich ein Gegenstand (ein langer Film) kontinuierlich in einer Richtung, so kann man das Bild eines Teils von ihm an derselben Stelle des Projektionsschirms bezw. der Netzhaut festhalten, wenn man mittels des Drehspiegels die entgegengesetzte Verschiebung vornimmt. Nach einiger Zeit tritt dann freilich sowohl die betreffende Spiegelfläche als auch der Teil des Gegenstandes (das Teilbild auf dem Film) aus dem Gesichtsfeld; inzwischen ist aber ein neuer Teil eingerückt. Aber solange man einen Teil sieht, steht er still. Wir haben also wie beim Reynaudschen Praximoskop (s. oben), eine kontinuierliche Bewegung des Gegenstandes optisch diskontinuierlich gemacht, jedoch so, daß die einzelnen Teile einige Zeit stationär sind.

Dieses Prinzip dürfte in Zukunft bei den Kinematographenapparaten die Alleinherrschaft an sich reißen und ist auch bereits vielfach angewendet worden (Abschnitt 6).

β) Das bewegte Objektiv. Eine Verschiebung der zur Projektion oder Betrachtung dienenden Linse hat eine ähnliche Wirkung wie der Drehspiegel, führt aber, weil die Strahlen nicht hin und zurück zu gehen brauchen, auf bequemere Anordnungen. Will man sich nicht mit geringer Geschwindigkeit begnügen, so muß die Bewegung eine rotierende sein. Man setzt also (nach Ducos de Hauron) das Objektiv in die Nähe des Randes einer Kreisscheibe, die man um eine durch den Mittelpunkt gehende Achse dreht; die optische Achse ist hierbei der Drehachse parallel. Um eine länger dauernde Unterbrechung zu vermeiden, muß man einen ganzen Kranz von Objektiven anwenden. Man kann auch die Anordnung so wählen, daß der Linsenkranz von einem Zylindermantel getragen wird und zwar so, daß die optischen Achsen radial stehen; allerdings ist diese Anordnung nicht so einfach anwendbar, da man entweder das Licht von der Seite in den Zylinder bringen und dort in Richtung eines Radius reflektieren oder aber zwei einander gegenüberliegende Objektive gleichzeitig benutzen muß; eine genauere Beschreibung solcher Vorrichtungen s. 7, S. 64.

γ) Prismatische Ablenkung läßt sich ebenfalls in mannigfaltiger Weise benutzen. So kann man zwei Prismen in der durch Figur 3 angedeuteten Weise anbringen. Ist

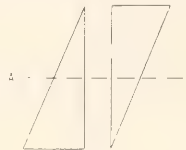


Fig. 3.

AB die optische Achse, so erhält man so gut wie keine Ablenkung, da das Prismenpaar wie eine planparallele Platte wirkt. Dreht man nun aber das eine Prisma um AB derart, daß die Spitze nach vorn kommt, und gleichzeitig das andere in entgegengesetzter Richtung, so wirken die Prismen ablenkend; z. B. liegen nach einer Drehung von 90° die brechenden Kanten nach derselben Seite, so daß sich die Wirkungen voll addieren. Die Gesamtablenkung erfolgt immer in einer bestimmten Ebene,[1]) also z. B. nur von oben nach unten. Bei der Anwendung im Kinematographen läßt man die Prismen sich nur um einige Zehner von Bogengraden drehen und dann wieder zurück, und sorgt durch geeignete Exzenterscheiben dafür, daß bei diesem Oszillieren der Hingang relativ langsam und zwar während der Lichtzeit, der Rückgang aber sprungweise während der Dunkelzeit erfolgt.

Im Gebrauch sind ferner vielseitige Prismen von gerader Seitenzahl, z. B. solche von quadratischem Querschnitt. Läßt man bei ihnen das Licht durch zwei einander

[1]) Man kann dies auf die Zusammensetzung zweier entgegengesetzten Kreisbewegungen zurückführen.

gegenüberliegende, also parallele Flächen gehen (Fig. 4), so entsteht keine Drehung, sondern nur eine seitliche Verschiebung der

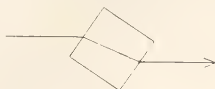


Fig. 4.

Strahlen. Auch diese kann zur Bildverschiebung benutzt werden, wenn sie genügend groß, d. h. das Prisma hinlänglich dick ist. Die Drehung erfolgt hierbei — und das ist ein Vorteil gegenüber der vorigen Methode — kontinuierlich, und es tritt, wie beim Linsenkranz und Drehspiegel, ein optisches Element (ein Seitenpaar) bereits in Tätigkeit, bevor das vorangehende ganz untätig ist.

Allen aufgeführten Einrichtungen ist, wenn sie stroboskopisch oder kinematographisch angewendet werden, gemeinsam, daß gleichsam das Sektorenverhältnis sehr groß ist, da ja überhaupt so gut wie kein dunkles Intervall entsteht. Demnach wird sowohl die Helligkeit als auch die Verschmelzung gefördert.

Sehr sinnreich ist auch eine Methode,[1]) bei der man eine konkave und eine konvexe Linse so aneinander vorbeischiebt, daß gleichsam ein Prisma mit veränderlichem Winkel entsteht. In der Stellung Figur 5a vertritt die Kombination ein Prismenpaar, dessen brechende Kante oben liegt; die Ablenkung erfolgt also nach unten. Umgekehrt ist es, wenn die Konkavlinse in die Stellung Figur 5b vorgerückt ist. In der Zwischen-

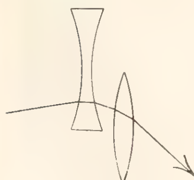


Fig. 5a.

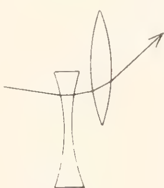


Fig. 5b.

stellung endlich wirkt das Linsenpaar wie eine planparallele Platte, lenkt also nicht ab. — Statt einer einzigen Konkavlinse wird in der Praxis ein Linsenkranz benutzt, wie oben bei Anwendung des Objektivkranzes.

δ) Die Anwendung einer mit photographischem Papier bespannten drehbaren Trommel, auf die man den schwingenden Punkt (s. Beispiele unter α) projiziert, steht mehreren der besprochenen Methoden sehr nahe. Man kann das Verfahren auffassen als eine Verschiebung des Projektionsschirms statt der projizierenden Teile. Die Methode ist aber u. a. dadurch gekennzeichnet, daß jede Stelle nur einmal belichtet werden darf; mit dem stroboskopischen Prinzip hat sie also nichts zu tun.

Bei allen anderen beschriebenen Einrichtungen kann dieses Prinzip die doppelte, beim Drehspiegel besprochene Rolle spielen.

4c) Die Querschwingung. Sie unterscheidet sich von der Querverschiebung dadurch, daß sie periodisch ihre Richtung ändert, kommt ihr freilich nahe, wenn sie sich sehr langsam vollzieht. Beispiel: Unten an einer pendelartigen Vorrichtung befestige man eine Glaslinse. Damit kann man in sehr einfacher Weise die Schwingungen eines Saitenpunktes (vgl. Abschnitt 4b α) projizieren.

Hier ist aber vornehmlich der Fall gemeint, bei dem die Periode der Querschwingung zu derjenigen des Vorganges ganz oder beinahe in einem einfachen ganzzahligen Verhältnis steht. Bei dem klassischen Beispiel von Lissajous' Figuren wird bekanntlich ein schmales Lichtbündel durch die Bewegung eines an einer Stimmgabel befestigten Spiegels abwechselnd nach oben und unten abgelenkt und gleichzeitig durch eine zweite Gabel nach rechts und links. Ein Blick auf die entstehende Figur gibt vollständigen Aufschluß über das Verhältnis der Perioden, der Phasen u. a. m. Das stroboskopische Prinzip spielt hierbei nur die Rolle, daß durch den Verschmelzungsvorgang die zusammenhängende Figur entsteht.

Hierher gehört auch das Vibrationsmikroskop von Helmholtz (Die Lehre von den Tonempfindungen), bei dem das Mikroskopobjektiv an einer Stimmgabelzinke befestigt ist und quer zu der Lichtlinie schwingt, die durch den schwingenden Saitenpunkt (s. oben unter 4b α) gebildet wird.

Mach [4 S. 41] projiziert einen periodisch hin- und herschwankenden Spektralstreifen auf das Schwingungsfeld einer Saite; er erhält so Lissajoussche Figuren, die Schwingungszahl und Charakter der betreffenden Farbenänderung erkennen lassen.

Alle diese Methoden haben die Kenntnis der auf die eine der beiden Schwingungen bezüglichen Größen zur Voraussetzung.

[1]) Sie wurde meines Wissens zuerst von Lummer benutzt; es handelte sich darum, an einer Kreisteilung, die zugleich mit ihrem Index rotierte, die Stellung des letzteren abzulesen. Die Anordnung war also so getroffen, daß die optische Verschiebung die mechanische aufhob.

4d) Die Momentphotographie. Sie hat allmählich unter den Methoden der Untersuchung schnell ablaufender Vorgänge den ersten Platz erobert, gehört aber zu unserem Gegenstand nur, sofern es sich um Reihenaufnahmen handelt. Diese werden nach zwei grundsätzlich verschiedenen Methoden erzeugt, a) durch intermittierende Belichtung des Gegenstandes, b) durch intermittierende Exposition mittels des Kinematographen. Das erstere Verfahren ist in bezug auf Schnelligkeit dem anderen weit überlegen (vgl. Abschnitt 5, besonders 5e); über das andere siehe 6.

5. Methoden der intermittierenden Untersuchung Die periodisch einsetzende Untersuchung ist das Hauptmerkmal des stroboskopischen Verfahrens und gibt ihm in allen Ausführungsformen gemeinsame Züge. Diese unterscheiden sich aber dennoch wesentlich je nach den besonderen Methoden. Wir beginnen mit den optischen; unter den hierher gehörigen Apparaten mit intermittierender Beleuchtung oder Betrachtung finden sich die stroboskopischen im engeren Sinne.

5a) Die rotierende Schlitzscheibe. Wir sahen dieses Hilfsmittel in dem ältesten Apparate in Verbindung mit der rotierenden Bildscheibe. Eine andere Ausführungsform, ebenfalls von Stampfer, macht den Spiegel überflüssig. Man setzt die Bildscheibe an das eine, die Schlitzscheibe an das andere Ende einer Achse. Gibt man letzterer eine Länge, die mindestens gleich der deutlichen Sehweite, also z. B. gleich 30 cm ist, so kann man nunmehr durch die Schlitze die Bilder direkt beobachten. Der Umstand, daß sich Spalte und Bilder bei den Stampferschen Apparaten gleichsinnig bewegen, macht die Besichtigungszeit relativ lang; die Bilder bewegen sich also während der Besichtigung merklich von der Stelle und werden unscharf, ein Uebelstand, der in dem Hornerschen Lebensrad (s. oben) in einfachster Weise vermieden ist.

Bei physikalischen Untersuchungen treibt man die Schlitzscheibe durch ein besonderes Triebwerk an. Hierzu kann dienen:

Ein Uhrwerk, wie man es zum Betrieb von Farbenscheiben u. dgl. benutzt. Töpler [6] bedient sich zur Konstanthaltung der Umlaufsgeschwindigkeit des folgenden Kunstgriffes: Ein Gehilfe zieht während des Ablaufs das Uhrwerk fortwährend wieder auf, und zwar bei jedem Schlage eines Metronoms um einen Zahn. Je nach der Einstellung des Metronoms erfolgt dann das Aufziehen bei größerer oder geringerer Federspannung und Umlaufsgeschwindigkeit.

Sehr geeignet sind nach meinen Erfahrungen die Triebwerke der Grammophone und ähnlicher Apparate, zumal sie verstellbare Tourenregulierung besitzen.

Ein Elektromotor ist geeignet, wenn er mit konstanter Spannung angetrieben wird; besonders aber dann, wenn er einen Zentrifugalregulator besitzt, durch den ein kleiner Stromanteil zu- oder abgeschaltet wird.

Eine Sirene, schon von Doppler 1845 benutzt, gestattet nach der Tonhöhe, die sie gibt, im besonderen nach den Schwebungen mit einer bekannten Stimmgabel, eine sehr genaue Beurteilung der Umlaufsgeschwindigkeit. Bei der Untersuchung tönender Körper ist das Anblasen der Schlitzscheibe mit einem Luftstrahl überhaupt ein gutes Mittel zur Beurteilung der Umlaufsgeschwindigkeit.

Die Benutzung der Schlitzscheibe kann in subjektivem oder objektivem Verfahren erfolgen. Von dem ersteren sprechen wir, wenn die Scheibe vor dem Auge, von dem letzteren, wenn sie vor der Lichtquelle rotiert, also den Gegenstand intermittierend beleuchtet (Doppler).

Beispiele geeigneter Gegenstände für die Untersuchung nach dieser Methode: Singende Flammen; schwingende Saiten oder Stimmgabeln; Luftsäulen in Pfeifen, wenn sich in ihnen schwebende Teilchen befinden; als solche können feine Korkstäubchen dienen, wie sie bei den Kundtschen Figuren angewendet werden oder (nach Töpler) die Nebeltröpfchen, die von einem mit Schwefelsäure bestrichenen Drahte herabsinken. Hierin liegt ein Mittel, die Größe der Amplitude an verschiedenen Stellen der Luftsäule zu bestimmen. Hingegen kann man die Druckschwankungen nach Boltzmann und Töpler (Pogg. Ann. 141 [1870] S. 321; vgl. auch Raps, Wied. Ann. 50 [1893] S. 193) sichtbar machen, indem man die mit ihnen parallel gehenden Schwankungen des Brechungsverhältnisses studiert. Diese Schwankungen werden wahrnehmbar, wenn man zwei Lichtbündel interferieren läßt, von denen das eine durch die tönende Luftsäule, das andere durch eine ruhende geht. Bei jeder Schwingung schwingen auch die entstandenen Interferenzstreifen, und dies kann stroboskopisch (oder photographisch) untersucht werden.

Das Sektorenverhältnis (s. oben Abschnitt 2) ist bei der rotierenden Schlitzscheibe von besonderer Wichtigkeit, und zwar bei Untersuchungen der soeben besprochenen Art, weniger zum Zwecke der Vermeidung des Flimmerns, als zur Erzielung scharfer Bilder. Die Schärfe ist desto größer, je kleiner das Sektorenverhältnis ist. Dem steht entgegen, daß die Helligkeit entsprechend abnimmt, da sie diesem Verhältnis proportional ist; dies ist eine Folgerung aus einem Satze von Talbot, dem wir die Form geben können, „wenn die Verschmelzungsfrequenz

erreicht oder überschritten ist, hängt die Helligkeitsempfindung nur von der gesamten pro Sekunde ins Auge gelangenden Lichtmenge ab, nicht aber von ihrer zeitlichen Verteilung". Man muß demnach zwar das Sektorenverhältnis klein halten, aber den entstehenden Helligkeitsverlust durch reichliche Beleuchtung ausgleichen.

Bei der Beschreibung seines Vibroskops macht Töpler darauf aufmerksam, daß auch die absolute Breite des Schlitzes, also nicht nur das Verhältnis zu dem verdunkelnden Zwischenstück, von Bedeutung ist. Es hat dies seinen Grund darin, daß während des Vorüberganges des Schlitzes vor der Pupille die Helligkeit durchaus nicht konstant ist. Vielmehr hat sie ein ausgeprägtes Maximum in der Mitte dieser Zeit. Der bei dieser Stellung empfangene Eindruck ist der maßgebende, wie sich u. a. darin zeigt, daß der beobachtete Gegenstand schärfer erscheint, als nach dem Sektorenverhältnis zu erwarten sein würde. Es ergibt sich aber auch, daß dieses Maximum verwaschener wird, wenn man den Schlitz breiter macht als die Pupille, und zwar selbst dann, wenn man gleichzeitig den verdunkelnden Sektor und auch die Geschwindigkeit entsprechend vergrößert. Andererseits ist es zwecklos und beeinträchtigt nur die Helligkeit, wenn man die Oeffnungen schmaler macht als die Pupillenöffnung (3 bis 4 mm). Eine größere Schärfe ist hierdurch nur zu erzielen, wenn man vor der rotierenden Scheibe noch feste Blenden anbringt, durch die man gleichsam die Pupillenöffnung schmaler macht.

Die Rücksichtnahme auf ein ausgeprägtes Helligkeitsmaximum gilt naturgemäß auch für das objektive Verfahren. Man läßt deshalb die rotierende Blende durch den Punkt der engsten Einschnürung des Lichtbündels gehen, das zur Beleuchtung des Objekts dient.

Eine Verzerrung des Bildes kann durch parallaktische Verschiebung zustande kommen. Es wird nämlich bei einem ausgedehnten Objekt ein Teil bei anderer Stellung des Schlitzes vor dem Auge beobachtet als ein anderer Teil. Deshalb gehören diese Teile zeitlich nicht zusammen, die Speiche eines sich drehenden Rades erscheint gekrümmt usw. Eine ähnliche Fehlerquelle ergibt sich in der Momentphotographie, wenn man den Anschützschen Schlitzverschluß anwendet; dieser gleitet dicht vor der Platte entlang, exponiert also die verschiedenen Teile nacheinander. Die so entstehenden Verzerrungen hat Behn rechnerisch und photographisch untersucht.

Diese Fehlerquelle, die zu ganz falschen Schlüssen z. B. über die Form einer schwingenden Saite führen kann, verringert man, wie leicht ersichtlich, dadurch, daß man das Auge dicht an die rotierende Scheibe bringt. Da dies aber nur in beschränktem Maße möglich ist, wendet Töpler ein Beobachtungsfernrohr an; der Mittelpunkt des Objektives vertritt gewissermaßen den Kreuzungspunkt der Strahlen im Auge. Er kann beliebig nahe an die Scheibe herangebracht werden.

Auch ein Mikroskop kann mit Vorteil zur Beobachtung herangezogen werden.

Ohne Aenderung der Beobachtungsfrequenz erhält man die verschiedenen Phasen des Vorganges, wenn man die „feste" Blende verschiebt (vgl. den folgenden Versuch).

5b) Die Stimmgabel mit schwingender Blende. Die hierauf beruhende, von Mach ausgebildete Methode wendet eine elektromagnetisch angetriebene Stimmgabel an. Allerdings ist die Periode der Unterbrechungen dann nur sehr wenig veränderlich. Der Apparat arbeitet aber in allen Fällen sehr bequem, bei denen man den zu untersuchenden Gegenstand passend auswählen und abstimmen kann.

Der an dem Ende der einen Stimmgabelzinke befestigten Blechplatte mit feinem Schlitz steht eine gleiche Blende gegenüber, die entweder fest montiert ist oder von dem Ende der anderen Zinke getragen wird; in letzterem Falle dauert die Belichtung nur halb so lange. Will man die verschiedenen Phasen eines Vorganges beobachten, so muß man die erstere Methode anwenden und dabei die feste Blende verschiebbar machen. Es ist zu beachten, daß, abgesehen von den äußersten Stellungen der festen Blende, zwei Belichtungen während einer ganzen Schwingung der Stimmgabel auftreten.

Eine intermittierende Verdunkelung erhält man, sobald an die Stelle entweder der festen oder der beweglichen Blende ein durchsichtiges Blättchen gesetzt wird, auf das ein schmaler schwarzer Strich gezeichnet ist. Man sieht dann z. B. bei einer schwingenden Saite das ganze Schwingungsfeld hell; aber auf diesem Hintergrunde heben sich eine oder zwei (s. oben) Einzellagen der Saite dunkel ab.

5c) Flammen wechselnder Größe, wie man sie mit Hilfe der Königschen Membrankapsel erhält, geben nach Mach [4] eine gute intermittierende Beleuchtung. Man beeinflußt, um genügende Helligkeit zu erzielen, mehrere Flammen durch dieselbe Membran. Anwendungsbeispiel: Man beobachtet einen tönenden Körper, indem man gegen die Membran eines in seiner Nähe aufgestellten Brenners nahe den gleichen Ton singt. Man sieht dann den von dem Brenner beleuchteten Körper sich ganz langsam bewegen.

5d) Geißlerröhren geben eine recht

kurze Beleuchtung. Um diese in einer willkürlich veränderlichen Frequenz auftreten zu lassen, bedient man sich eines Kontaktrades.

In der vollkommeneren Form des Anschützschen Schnellsehers, die man als den Vorläufer der modernen Kinematographen ansehen muß, drehte sich eine Scheibe, an deren Umfang die einzelnen Bilder angebracht waren. Die Drehung erfolgte kontinuierlich, aber jedes einzelne Bild wurde immer nur, wenn es vor dem Beschauer stand, durch das Aufblitzen eines flächenartig aufgewickelten Geißlerrohres für sehr kurze Zeit belichtet. Die übereinstimmenden Teile der Bilder standen deshalb still, während die von einer Aufnahme zur anderen sich ändernden eine Bewegung ergaben. Es ist leicht ersichtlich, wie man hierbei die Kontakte an der Scheibe selbst anbringen kann. Das Verfahren ist in entsprechender Aenderung auch zu Aufnahmen geeignet.

5e) Der elektrische Funke. Er stellt den eklatantesten Fall einer Momentanbeleuchtung dar, da seine Dauer durch passende Wahl der benutzten Leydener Flasche (nicht zu große Kapazität), geeigneten Elektrodenmaterials (geringe Entwicklung glühenden Dampfes) und anderer Umstände äußerst kurz bemessen werden kann. Ohne die Wirksamkeit, speziell die photographische zu vernichten, kann man die Funkendauer auf eine milliontel Sekunde und weniger reduzieren. In einer so kurzen Zeit erscheinen selbst sehr schnell bewegte Gegenstände, z. B. fliegende Geschosse u. dgl. so gut wie stillstehend.

Zweck der Anwendung von Funken ist zumeist die Herstellung einer verhältnismäßig geringen Zahl von Bildern — z. B. 1 bis 20 — die zum unmittelbaren Studium, seltener zu stroboskopischer Betrachtung dienen. Deshalb sei über die Herstellung von Reihenbildern mittels dieses Hilfsmittels nur das folgende kurz erwähnt: Funken von relativ geringer Frequenz, bis zu einigen hundert in der Sekunde, erhält man mit den modernen schnellaufenden Unterbrechern oder mit Kontakträdern; man schaltet sie in bekannter Weise mit einem Induktorium und Leydener Flaschen zusammen. Die Funkenstrecke kann etwa aus Magnesiumstäben bestehen. Das lichtempfindliche Band wird kontinuierlich bewegt, und zwar sehr schnell; während der kurzen Dauer des Funkens steht es praktisch dennoch so gut wie still. Kürzere Filmstreifen spannt man auf eine Trommel (vgl. z. B. Wachsmuth, Drudes Ann. d. Phys. 14 [1904] 491), längere ordnet man treibriemenartig an. Eine schnellere Funkenfolge ermöglichen Hochfrequenzmaschinen; z. B. ist ein Modell von Boas, das 5000 Funken pro Sekunde gibt von Cranz [9] zur Konstruktion seines ballistischen Kinematographen benutzt worden.

Durch Partialladungen und -entladungen kann die Zahl der Funken noch erheblich gesteigert werden. Im ersteren Fall wird während eines Induktionsstoßes die Leydener Batterie infolge reichlicher Elektrizitätszufuhr mehrere Male geladen und entladen. Andererseits kann eine einmal geladene Batterie mehrere Partialfunken nacheinander geben.

Wachsmuth konnte bei den soeben angeführten Versuchen die Schwingungsphasen einer mit Tabakrauch sichtbar gemachten Luftlamelle mit Hilfe von Partialfunken etwa achtmal während einer Periode photographieren, obwohl die Schwingungszahl 435 pro Sekunde betrug.

In sehr vollkommener Weise ist dieses Verfahren durch Hauptmann Schatte im ballistischen Laboratorium der militärtechnischen Akademie Charlottenburg ausgebildet worden [10]. Es wird mittels einer Influenzmaschine ein Kondensator von beispielsweise 0,1 Mikrofarad geladen und dann über einen großen Widerstand für kurze Zeit, etwa 0,01 sec, mit einem kleinen Kondensator von 50 bis 300 cm verbunden. Sobald dieser eine gewisse Spannung erreicht hat, entladet er sich über eine kleine Funkenstrecke, ladet sich aufs neue usf. Man kommt so bis auf 50 000 Funken pro sec und noch höher. Selbst die modernen schnell fliegenden Geschosse lassen sich demnach auf kurzen Strecken, z. B. 20 cm, mehrere Male photographieren. Derartige Photogramme s. in Cranz, Lehrbuch der Ballistik; eine Probe aus Schatte [10] in Figur 6.

5f) Der rotierende schmale Projektionsschirm. Eine solche Vorrichtung gibt Mikola an (Ann. d. Phys. 20 [1906] 619). Auf dem dunkel gestrichenen Mantel eines um eine senkrechte Achse rotierenden Zylinders sei ein ebenfalls senkrechter schmaler weißer Streifen gezeichnet. Entwirft man auf dem Zylinder das Bild einer wagrechten Saite oder eines Steges, der an einer Membran usw. befestigt ist, so zeigt der Streifen einen schwarzen Punkt, dessen zeitlich verschiedene Lagen bei Drehung des Zylinders räumlich nebeneinander fallen. Eine deutlich sichtbare Wellenlinie entsteht hieraus, wenn die Vorgangsfrequenz ein Multiplum der Beobachtungsfrequenz ist. Letztere kann man dadurch steigern, daß man mehrere weiße Streifen anbringt. — Ersichtlich ist dieses Verfahren recht einfach und zur Bestimmung von Schwingungszahlen sowie zur Demonstration auch geeignet. In bezug auf die Analyse eines Schwingungsvorganges aber steht das Verfahren dem der photographischen Trommel (Abschnitt 4b δ)

offenbar nach; denn es hat das stroboskopische Prinzip zur Voraussetzung, muß also z. B. versagen, wenn dieses, wie bei unharmonischen Obertönen, nicht gleichzeitig auf die Grund- und Teilschwingungen eines Körpers anwendbar ist.

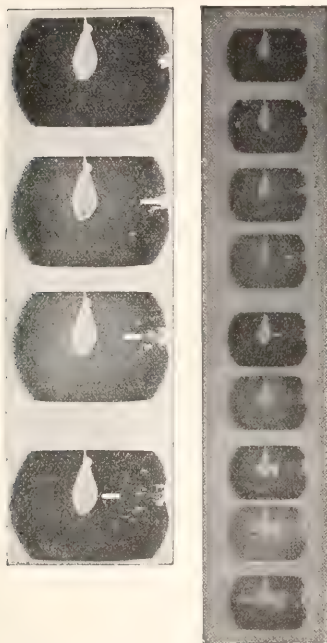
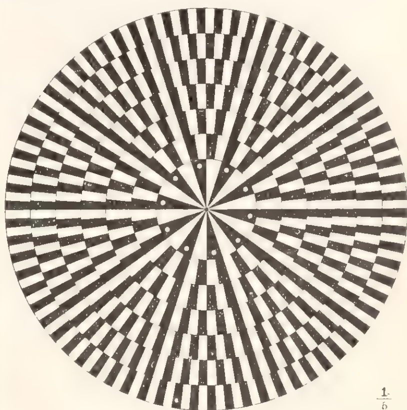


Fig. 6. Durchschießung einer mit Wasser gefüllten Gummiblase. Aufnahmefrequenz 20000 pro sec. Vergrößerung der Originalaufnahme rechts 2:1, links 4:1. Man sieht u. a. das Wasser aus der Einschußstelle pilzartig nach rückwärts austreten. Die Splitter in der linken Reihe rühren von einer Pappscheibe her, die die Pulvergase zurückhalten soll.

5g) Untersuchung intermittierender Lichtquellen. Hierbei dient die Lichtquelle als Gegenstand, nicht als Mittel der Untersuchung. In Betracht kommen vorzugsweise der Wechselstromlichtbogen, Geißlerröhren, intermittierende Flammen. Das Interesse ist in der Regel auf die Bestimmung der Frequenz gerichtet. Man benutzt Einrichtungen ähnlich der unter 5f beschriebenen, oder Scheiben, die mehrere Reihen von Punkten kreisförmig angeordnet aufweisen, z. B. einen Kreis mit 20, einen mit 21, einen mit 19 Punkten. Unter den in Abschnitt 3 erläuterten Bedingungen sieht man die Punkte stillstehen bezw. in dem einen oder anderen Sinne wandern und kann bei bekannter Umlaufsgeschwindigkeit die Frequenz der Lichtwechsel bestimmen. Recht geeignet zu solchen Bestimmungen ist auch die Scheibe von Samojloff (Fig. 7).



$\frac{1}{5}$

Fig. 7.

Die Wechselstrombogenlampe ist in ihrem Lichtwechsel abhängig von der Frequenz des Wechselstromes, die man also auf diese Weise bestimmt. Beleuchtet man mittels zweier Lampen dieselbe Scheibe, so gewinnt man nicht nur über die Frequenz, sondern auch über die Phase Aufschluß; es empfiehlt sich hierbei, die Scheibe nur mit wenigen Marken zu versehen, z. B. nur mit einem einzigen weißen Radius auf schwarzem Grunde. Hiervon kann man u. a. beim Parallelschalten von Generatoren Gebrauch machen.

Bei elektrischen Entladungen betrachtet man bisweilen statt einer gedrehten beleuchteten Scheibe die Lichtquelle selbst, die man in diesem Falle drehbar anordnet. So läßt Graf Arco (Elektrotechn. Zeitschr. 1910 S. 506) eine schmale, radial gestellte Geißlerröhre rotieren und erhält so ein Urteil über die Wirkung gewisser Anordnungen bei funkentelegraphischen Sendern. Während z. B. im allgemeinen so viel leuchtende Radien auftreten wie die Wechselstrommaschine während eines Umlaufs Stromimpulse gibt, kann man bei starker Erregung des Feldmagneten mehrere Partialentladungen für einen Wechsel beobachten. Umgekehrt

bedarf es bei sehr schwacher Erregung zunächst einer Aufladung der Leydener Flaschen mit Hilfe von Resonanz, es sind also mehrere Wechsel nötig, bis die Entladung einsetzt. — Auch auf die Dämpfung der Schwingungen kann man einen Schluß ziehen, indem man die scheinbare Breite eines Bildes der Geißlerröhre beachtet.

5h) Nichtoptische Methoden. Auch bei anderen als optischen Hilfsmitteln empfiehlt sich bisweilen zur Untersuchung schnell wechselnder Vorgänge ein intermittierendes Verfahren, das dann dem stroboskopischen im engeren Sinne sehr verwandt ist. Man kann z. B. den wechselnden Luftdruck im Schwingungsknoten einer Orgelpfeife nicht ohne weiteres mittels eines angesetzten Manometers messen, da dieses den schnellen Wechseln nicht folgen würde. Bringt man jedoch in der Pfeifenwand eine Oeffnung und vor dieser einen kleinen Schieber an, der durch eine auf den Pfeifenton abgestimmte elektromagnetische Stimmgabel geöffnet und geschlossen wird, so zeigt das Manometer nunmehr einen konstanten Druck an, der der Phase des geöffneten Schiebers entspricht. Es ist leicht ersichtlich, daß man bei geringer Differenz zwischen Vorgangs- und Beobachtungsfrequenz alle Druckphasen in langsamer Folge am Manometer beobachten kann.

Zur Aufzeichnung des Indikatordiagramms schnell laufender Dampfmaschinen ist dieses Verfahren ebenfalls mit Erfolg benutzt worden. Die gewöhnlichen Indikatoren besitzen bekanntlich einen kleinen Kolben, der einerseits durch eine elastische Feder, andererseits durch den Dampf gedrückt wird, den man dem Zylinder der Maschine entnimmt. Das so gebildete Manometer zeichnet seine Angaben auf einer Trommel auf, die entsprechend dem vom Kolben durchlaufenen Weg gedreht wird. Das Diagramm hat also als Abszisse den Weg, als Ordinate die Kraft, und seine Fläche stellt somit die Arbeit dar. Bei den schnellaufenden Dampfmaschinen würde auch hier die Trägheit des Apparates stören, und auch in diesem Falle wird die Schwierigkeit durch intermittierende Verbindung des Indikatorzylinders mit dem Maschinenzylinder behoben. Das Oeffnen und Schließen des betreffenden Verbindungsrohres läßt sich sehr sicher mittels eines von der Maschine selbst betriebenen Räderwerks in der Weise besorgen, daß man in langsamer Folge alle Phasen des Drucks aufzeichnet.

Auch bei elektrischen Maschinen bedient man sich eines analogen Verfahrens. Soll z. B. die Spannung einer Wechselstrommaschine in ihrem wechselnden Verlaufe, also während der in der Regel eine fünfzigstel Sekunde dauernden Periode gemessen werden, so kann man auf der Maschinenwelle ein Rad mit einem Kontakt anbringen, der mit den Enden der Wickelung verbunden ist. Stellt man diesem sich drehenden einen festen Kontakt gegenüber, der mit den Belegungen eines Kondensators verbunden ist, so findet (bei einer zweipoligen Maschine) während jeder Periode einmal eine Berührung statt. Der Kondensator nimmt also die Spannung an, die dem Augenblick der Berührung entspricht, und diese Spannung wird demnach meßbar. Für andere Zeitpunkte führt man die Messung aus durch Verschiebung des festen Kontakts, ein Verfahren, das der Verschiebung der festen Blende (5b) analog ist. So kann man den ganzen Spannungsverlauf feststellen.

6. Der Kinematograph. Er verdient eine besondere Betrachtung, nicht nur weil sich in ihm eine große Zahl der oben beschriebenen Hilfsmittel vereinigt, sondern auch, weil er das stroboskopische Prinzip nur in weiterem Sinne verkörpert. In der Regel handelt es sich nämlich bei ihm nicht um Darstellung periodischer Vorgänge, so daß alle in Abschnitt 3 über die Frequenz angestellten Betrachtungen fortfallen. Hingegen bildet der Kinematograph eine großartige Vervollkommnung der historischen Apparate wie Lebensräder u. dgl. und hat wegen der immerhin recht großen Treue, mit der er Lebensvorgänge darstellt, in Wissenschaft und Unterricht erhebliche Bedeutung gewonnen.

Beim Kinematograph werden bekanntlich die aufeinanderfolgenden Phasen eines Vorgang, auf ein langes Band, den Film photographiert. Bei der Reproduktion werden diese Bilder in der Regel diskontinuierlich vor das Auge gebracht, also nicht wie früher beim Anschützschen Schnellseher (Abschnitt 5d) kontinuierlich bewegt und intermittierend beleuchtet. Diese Art der Reproduktion kann durch verschiedene Mittel erzielt werden:

1. Das Mutoskop. Sein Vorläufer war der Buchkinematograph, der aus einem kleinen Buch besteht, dessen Blätter einseitig mit den Phasenbildern bedruckt sind. Biegt man ein solches Buch zwischen Daumen und Zeigefinger etwas um und läßt den Daumennagel über den Rand der Blätter hinweggleiten, so blättern diese sich in schneller Folge um. Dabei steht jedes einzelne kurze Zeit vor dem Auge, bis es durch das folgende verdeckt wird. Man erhält auf diese Weise den Eindruck einer Bewegung. Bei dem eigentlichen Mutoskop ist die Zahl der Bilder größer, das Buch also dicker. Es wird dann der Rücken des Buches an einer Achse derartig befestigt, daß die Blätter angenähert radial stehen. Die Achse wird langsam gedreht, wobei die Blätter an einem

Stift vorbeigeführt werden, der also den Daumennagel ersetzt. Derartige Apparate sind noch heute vielfach im Betrieb, in der Regel als Automaten.

2. Die Projektionsapparate mit ruckweise verschobenem Band. Die Projektionskinomatographen leisten bekanntlich viel Vollkommeneres als die Mutoskope. Der Vorgang beim Projizieren spielt sich bei der gekennzeichneten Art der Bandverschiebung in folgender Weise ab: Es wird ein ruhendes Phasenbild projiziert. Dann wird das Licht durch einen rotierenden Sektor abgeschnitten und zugleich der Film um die Länge eines Bildes weiter gezogen. Nunmehr wird das neue Bild projiziert. Bei diesem Verfahren kann man, ohne das immerhin empfindliche Bildband zu gefährden, höchstens bis zu einer Frequenz von etwa 20 pro Sekunde gehen. Wie die in Abschnitt 2 angeführten Zahlen zeigen, liegt aber die Verschmelzungsfrequenz erheblich höher, wenn wir eine angemessene Beleuchtungsstärke, etwa 50 Meterkerzen, voraussetzen. Allerdings brauchen wir mit der Frequenz nicht bis zu der hierfür sich ergebenden Zahl von etwa 46 pro Sekunde zu gehen, wenn das Sektorenverhältnis, also das Verhältnis zwischen Lichtzeit und Dunkelzeit größer als 1 ist. Würden wir ein Verhältnis 7:1 wählen, so würde sich, wie früher erwähnt, eine Verschmelzungsfrequenz von zwei Drittel des Normalwertes ergeben. Dies wären etwa 30, also immer noch erheblich mehr als die zulässige Höchstzahl von 20; und dabei müßte der ruckweise Bildtransport bereits in $^1/_7$ von $^1/_{30}$, also in $^1/_{210}$ Sekunde stattfinden. Ein eigentümliches Mittel, durch das man zu günstigeren Bedingungen gelangt, besteht in der Zwischenverdunkelung. Man läßt dabei einen oder mehrere schmale verdunkelnde Sektoren innerhalb der Zeit, während deren das Bild entworfen wird, durch das Strahlenbündel gehen. Das Bild selbst wird hierbei nicht transportiert. Dennoch aber erhält der Beschauer zwei- oder dreimal so viel Lichtwechsel wie zuvor, und dies wirkt auf die Verschmelzung günstig ein. Allerdings ist dieser Kunstgriff mit einiger Einbuße an Licht verknüpft, die aber nicht groß zu sein braucht. — Die schmalen Sektoren für die Zwischenverdunkelung bilden zusammen mit dem größeren Sektor für die Verdunkelung während des Bildtransports eine rotierende Blendenscheibe.

Recht mannigfaltig und sinnreich sind die Vorrichtungen für den Bildtransport. Hierher gehören u. a.:

a) Das Malteserkreuz. Der Film trägt (Fig. 8) an beiden Seiten eine Perforation, in die die Zähne der Walze W eingreifen. Diese Walze, deren Umfang beispielsweise gleich vier Bildhöhen ist, dreht sich diskontinuierlich. Sie geht nämlich immer dann um 90°, also um ein Bild weiter, wenn das gleichmäßig bewegte Rad B den auf ihm befestigten Stift E in einen der vier Schlitze des Kreuzrades S schiebt. Nach einer Vierteldrehung steht das Kreuzrad sofort wieder still, weil die mit B fest verbundene Scheibe einen der vier konkaven Ausschnitte an seiner Peripherie immer gerade ausfüllt.

Nur in der Umgebung des Stiftes besitzt A eine Aussparung, so daß die hemmende Wirkung fortfällt. Mit der Achse, um die sich die Doppelscheibe AB dreht, steht auch die rotierende Blende auf irgendeine Weise in Verbindung.

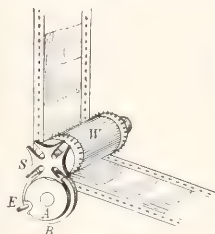


Fig. 8.

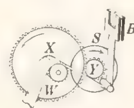


Fig. 9.



Fig. 10.

Damit das Filmband gespannt ist, muß es bei dieser wie bei den folgenden Konstruktionen mit sanfter Reibung durch eine Bremse laufen, bevor es auf die Walze W kommt.

b) Der Schläger (Fig. 9). Aus einer Bremse der soeben beschriebenen Art laufe der Film ein Stück von einigen Zentimetern geradlinig, bis er auf die mit Zähnen versehene Walze W kommt. Wenn ihn inzwischen ein Stab zur Seite drückt, sodaß das geradlinige Stück geknickt wird, so wird dieses dadurch länger. Man richtet es so ein, daß diese Verlängerung wieder der Bildhöhe gleich ist. Der Stab ist auf einer Scheibe S befestigt, die durch die Zahnradübersetzung XY mit passender Geschwindigkeit gedreht wird.

c) Der Greifer (Fig. 10). Dies ist eine kleine Pleuelstange, die durch einen Exzenter auf und ab bewegt wird. Sie trägt am oberen Ende zwei Krallen, mit denen sie in die Perforation rechts und links eingreift, um so das Band herabzuziehen. Diese Bewegung ist an sich diskontinuierlich, und durch besondere Formen der Exzenterscheiben, z. B. durch Anwendung eines Dreiecks mit abgerundeten Ecken, das innerhalb eines größeren Vierecks schleift, kann man die Geschwindigkeit beim Ab-

wärtsgehen des Greifers steigern, also die Transportzeit verkürzen.

3. Die Apparate mit kontinuierlich bewegtem Film. Sie bedürfen einer besonderen Vorrichtung, durch die das während seiner Bewegung projizierte Bild optisch stationär gemacht wird. Die hierzu dienenden Apparate haben wir bereits kennen gelernt, nämlich in Abschnitt 4b bei der „Querverschiebung". Hier werden sie so angewendet, daß sie das Bild entgegengesetzt verschieben, wie es durch die Bewegung des Films laufen würde. Es steht dann scheinbar still, wird aber allmählich durch das nächste Bild ersetzt. Offenbar erreicht man hierdurch einerseits den Vorteil einer größeren Lichtstärke, und andererseits kann man bei kontinuierlich bewegtem Band die Frequenz außerordentlich steigern; auch wird der Mechanismus einfacher.

Zur Herstellung der Aufnahmen können grundsätzlich dieselben Apparate dienen wie zur Wiedergabe. Nur sind sie zu ergänzen durch die lichtdichten Behälter, die den Film vor und nach der Exposition aufnehmen. Am verbreitetsten dürfte heute der Apparat mit dem oben unter c) beschriebenen Greifer sein.

Literatur. *1. Pogg. Annalen d. Ph. u. Ch., 32 (1834), S. 647.* — *2.* ***Horner****, Phil. Mag., Ser. III, Vol. IV, 36, und Pogg. Annalen, 32 S. 650.* — *3.* ***Plateau****, Bullet. de Acad. de Belgique, III (1836), 364, abgedruckt bei Mach (Lit. 4).* — *4.* ***Mach****, Optisch-akustische Versuche, 69 (Prag 1873).* — *5.* ***Doppler****, Abh. d. kgl. böhm. Ges. d. Wissensch., V, 3 (1845) 779; abgdr. in 4.* — *6.* ***Töpler****, Pogg. Ann. 128 (1866), 108.* *7.* ***Lehmann****, Die Kinematographie, ihre Grundlagen und Anwendungen (Aus Natur- und Geisteswelt 358).* — *8.* ***Marbe****, Theorie der kinematographischen Projektionen. Leipzig 1910.* — *9.* ***C. Cranz****, Ztschr. f. d. ges. Schieß- u. Sprengstoffwesen, 4 (1909), Heft 17, auch abgedr. in Deutsche Mechanikerztg. (1909), 173.* — *10.* ***Schatte****, Ztschr. f. d. ges. Schieß- u. Sprengstoffw., 7 (191[illegible]), Heft [illegible].*

P. Spies.

Strom.

Strom bei den Eruptivgesteinen. Vgl. den Artikel „Lagerungsform der Gesteine".

Strömungsströme und Elektrophorese.

1. Die Tatsachen. 2. Gesetzmäßigkeiten (unabhängig von der Natur der sich berührenden Stoffe). 3. Theorie. 4. Ueber den Ladungssinn bei der Berührung von Nichtleitern. 5. Einfluß von Elektrolyten. 6. Technische Anwendungen. 7. Die Elektrostenolyse.

1. **Die Tatsachen.** Das hier zu behandelnde Gebiet umfaßt die Phänomene der Reibungselektrizität bei Flüssigkeiten. Die Erscheinungen sind wesentlich anderer Art und fordern zu ihrer Deutung andere Grundlagen als diejenigen des Galvanismus, d. h. der Stromerzeugung durch chemische Vorgänge (galvanische Ketten) und der Erzeugung chemischer Vorgänge durch den elektrischen Strom (Elektrolyse). Hier handelt es sich nicht um chemische Vorgänge als Quelle der Elektrizitätserregung oder als Wirkung äußerer elektrischer Kräfte; vielmehr erweist sich im folgenden zur Erregung einer elektromotorischen Kraft die relative Bewegung einer Flüssigkeit gegen einen anderen, sie berührenden Stoff erforderlich (Strömungsströme) und entsprechend bewirkt eine äußere elektromotorische Kraft solche relative mechanische Bewegung (Elektrophorese).

a) Strömungsströme. α) Durch mechanische Bewegung der Flüssigkeit. Kittet man, um eine große Berührungsfläche zwischen einer Flüssigkeit und einem festen Stoff zu haben, eine poröse Tonplatte zwischen zwei Glasröhren (Fig. 1) mit eingeschmolzenen Elektroden und preßt eine schlechtleitende Flüssigkeit, z. B. destilliertes Wasser hindurch, etwa indem man es in den oberen Teil einbringt und am unteren Ende mit Hilfe der Wasserstrahlpumpe saugt, so zeigt ein empfindliches Galvanometer einen elektrischen Strom an. Die Stromrichtung kehrt sich um, wenn das Wasser in der anderen Richtung durchgesaugt wird: die Richtung des positiven Stroms ist die des strömenden Wassers.



Fig. 1.

β) Durch mechanische Bewegung des festen Stoffes. Vertauscht man bewegten und ruhenden Stoff, indem man fein pulverisierten Ton durch ein langes, mit destilliertem Wasser gefülltes Glasrohr fallen läßt, so zeigt sich das Auftreten eines elektrischen Stroms zwischen zwei an den Enden des Rohres befindlichen Platinelektroden. Dabei ist die Stromrichtung entgegengesetzt derjenigen bei bewegtem Wasser: das Wasser wirkt als ob es positive, die Tonpartikel als ob sie negative Ladungen transportierten.

b) Elektrophorese. α) Der Flüssigkeit. Um das inverse Phänomen des durch

bewegte Flüssigkeit entstehenden Strömungsstroms zur Anschauung zu bringen, kann man sich ebenfalls des Apparates Figur 1 bedienen, indem man an die Elektroden eine elektromotorische Kraft, etwa die Lichtleitung, anlegt. Noch einfacher ist es, wenn man einen gewöhnlichen unglasierten Tonteller (Fig. 2 aus Coehn, Elektrochemie in Müller-Pouillets Lehrb. d. Physik IV),



Fig. 2.

wie er zum Trocknen von Niederschlägen benutzt wird, auf einen Porzellanring setzt und oberhalb und unterhalb als Elektroden Platin- oder Bleistreifen anbringt. Während eingegossenes destilliertes Wasser sich sonst im Teller hält, rinnt es bei Stromschluß in der durch die Vorzeichen angegebenen Richtung durch den Teller in ein darunter-gestelltes Gefäß. Bei Stromunterbrechung hört das Durchtropfen sofort auf und unterbleibt auch bei Stromumkehr. Das Wasser bewegt sich also in der Richtung des positiven Stroms zur Kathode. Weil der Durchtritt von Wasser durch enge Poren rein äußerlich an den Wassertransport durch Osmose erinnert, hatte man die Erscheinung unzutreffend als „Elektroosmose“ oder gar „Elektroendosmose“ bezeichnet. Passender erscheint „Elektrophorese“, wobei man je nach der Richtung zur Kathode oder Anode Kataphorese und Anaphorese unterscheidet.

β) Elektrophorese des festen Stoffes. Bringt man in ein U-Rohr in destilliertem Wasser suspendiertes feines Tonpulver und legt an zwei in die Schenkel eintauchende Platinelektroden eine Potentialdifferenz, so sieht man das Tonpulver entgegen der positiven Stromrichtung, also zur Anode wandern. Während das Wasser gegenüber einem Tondiaphragma Kataphorese zeigt, ergibt das Tonpulver im Wasser Anaphorese.

Sowohl die Richtung der Strömungsströme wie auch die Richtung der Elektrophorese sind abhängig von der Natur der gegeneinander bewegten Stoffe: benutzt man statt des Wassers z. B. Terpentinöl in Berührung mit Ton, so verlaufen alle Erscheinungen im umgekehrten Sinne.

2. Gesetzmäßigkeiten (unabhängig von der Natur der sich berührenden Stoffe). a) Strömungsströme. α) Durch bewegte Flüssigkeiten. Das Auftreten einer elektromotorischen Kraft beim Durchdrücken von Flüssigkeiten durch ein Tondiaphragma ist von Quincke 1859 entdeckt worden. Die elektromotorische Kraft erweist sich bei derselben Flüssigkeit

1. proportional dem angewandten Druck,
2. unabhängig von der Dicke der Tonwand,
3. unabhängig von der Oberfläche der Tonwand,
4. unabhängig von der durchfließenden Flüssigkeitsmenge.

Das Phänomen ist, wie in einem Diaphragma, so auch in einer Einzelkapillare zu erhalten, wie insbesondere Dorn zeigte. Ist diese so eng, daß für die Strömung bei dem angewandten Druck noch das Poiseuillesche Gesetz (das durchfließende Volumen proportional der vierten Potenz des Radius) gilt, so ist die entstehende elektromotorische Kraft wieder

1. proportional dem angewandten Druck,
2. unabhängig von der Länge der Kapillare,
3. unabhängig von dem Querschnitt der Kapillare.

In Röhren, für welche das Poiseuillesche Gesetz nicht mehr zutrifft, ist die beim Strömen entstehende elektromotorische Kraft ebenfalls proportional dem angewandten Druck, aber abhängig vom Querschnitt und zwar annähernd umgekehrt proportional dem Durchmesser des Rohres.

β) Durch Bewegen festen Stoffes. Hier sind die den vorigen entsprechenden Gesetzmäßigkeiten zu erwarten, vor allem die Abhängigkeit der entstehenden elektromotorischen Kraft von dem wirkenden Druck. In der Tat konnten Smoluchowski und Stock zeigen, daß die Potentialdifferenz, welche durch das Herabfallen von Quarzpulver in einem mit schlechtleitender Flüssigkeit gefüllten langen Glasrohr an zwei eingeschmolzenen Platindrähten erzeugt wird, direkt proportional ist der zwischen den Elektroden sich bewegenden Gewichtsmenge des Quarzpulvers.

b) Elektrophorese. α) Der Flüssigkeit. Die Erscheinung der elektrischen Durchführung von Wasser durch poröse

Stoffe wurde bereits 1807 von Reuß bemerkt, aber erst 1852 von Wiedemann und 1861 von Quincke näher untersucht. Wiedemann bediente sich zur Messung der übergeführten Wassermenge des Apparates Figur 3.

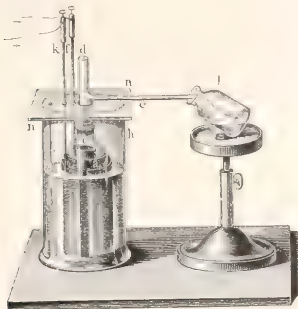


Fig. 3.

Auf eine Tonzelle ist oben eine tubulierte Glasglocke gekittet, in deren Oeffnung ein Rohr d mit seitlichem Ausflußrohr e eingesetzt ist. Innerhalb der Tonzelle steht ein Kupfer- oder Platinblech c, von welchem ein Draht f luftdicht in die Wand der Glasglocke eingefügt, zum negativen Pol der Stromquelle führt. Außerhalb der Tonzelle befindet sich die Platinanode i, das Ganze steht in dem Glaszylinder h. Dieser, sowie die Tonzelle werden mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllt. Es ergab sich:

1. Bei derselben Flüssigkeit ist die in der Zeiteinheit übergeführte Menge m proportional der Stromstärke J; der Quotient $\frac{m}{J}$ ist also für eine bestimmte Flüssigkeit konstant: $m = c\,J$.

2a. Vermindert man die Oberfläche des Tonzylinders, indem man sie teilweise mit Wachs bedeckt, so muß, da nun weniger leitende Poren vorhanden sind, bei gleichbleibender elektromotorischer Kraft die Stromstärke J sinken: entsprechend sinkt auch die übergeführte Menge m.

2b. Schabt man die Wand dünner, so muß, da der Porenwiderstand dadurch abnimmt, J steigen: entsprechend steigt m.

Bei gleichgehaltener Stromstärke ist also die übergeführte Menge unabhängig von der Oberfläche und der Dicke des Tonzylinders, d. h. es bleibt der Wert von $\frac{m}{J}$ konstant. Erst bei Ueberschreitung einer bestimmten Stromstärke für ein gegebenes Diaphragma verliert, wie Cruse zeigte, dieser Wert seine Konstanz.

Zur weiteren Prüfung dieser Gesetzmäßigkeit ist es nicht angängig, die Stromstärke durch Zusatz von Elektrolyten zu ändern. Denn die in der Zeiteinheit durch die Poren geführte Menge muß ja auch von der inneren Reibung der Flüssigkeit abhängen; diese aber ist durch den Elektrolytzusatz geändert. Wiedemann machte die Versuche von der inneren Reibung unabhängig, indem er an seinem Apparat das Rohr d verschloß (Fig. 4) und an die Stelle des

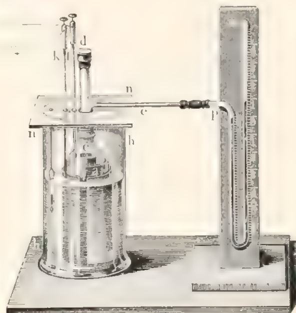


Fig. 4.

Ausflußgefäßes ein Manometer m brachte. In diesem stieg bei Stromdurchgang das Quecksilber so hoch, bis sein Druck die Wirkung der emportreibenden Kraft der Kataphorese gerade kompensierte.

Die Versuche mit dieser Anordnung ergaben, daß für ein Diaphragma und dieselbe Flüssigkeit der im Manometer erreichte Druck p proportional der elektromotorischen Kraft e ist: $p = c_1 e$ (c soll hier in allen Gleichungen einen Proportionalitätsfaktor bezeichnen).

Dieses Ergebnis steht im Einklang mit dem vorher erhaltenen $m = c\,J$. Denn wird eine Flüssigkeit bei konstantem Druck p durch Kapillaren gedrückt, so ist die ausfließende Menge direkt proportional der Anzahl der Kapillaren — bei Tondiaphragmen also proportional der Oberfläche o — und umgekehrt proportional der Länge der Kapillaren, also der Dicke d der Tonzelle; d. h. es ist $m = c_2 . \frac{p . o}{d}$. Da nun m auch proportional J war, so ist auch $\frac{p . o}{d}$ proportional J oder $p = c_3 \frac{J . d}{o}$. Es ist aber

$\frac{d}{\delta}$ bei gleichbleibender Leitfähigkeit der Flüssigkeit proportional dem Widerstande w; also ist p proportional Jw; dies ist aber, da Jw = e, die von Wiedemann bei der Druckmessung gefundene Beziehung $p = c_1 e$.

Wird in dieser Versuchsanordnung der Flüssigkeit ein Elektrolyt, z. B. Kupfersulfat hinzugefügt, so bleibt die Aenderung der inneren Reibung ohne Einfluß und die Steighöhe $p = c_1 Jw$ sinkt mit der Abnahme des Widerstandes w.

Mit der Weite der Kapillaren nimmt das Phänomen sehr stark ab. Während bei den engporigen Tonzellen schon wenige Volt genügen, um die Kataphorese deutlich zu machen, bedarf es einiger Hundert Volt, um sie in einer einzelnen Glaskapillare nachzuweisen.

Quincke benutzte dazu den in Figur 5 abgebildeten Apparat. In eine von isolierenden Stützen getragene Glaskapillare CD sind drei Platindrähte P_1, P_2, P_3 eingeschmolzen. Die Flüssigkeit kann aus dem Ansatz N in die um einen bekannten Winkel nach oben gerichtete Kapillare zu der Skala bei D geblasen werden. Beim Anlegen einer ausreichenden Spannung an zwei von den Platindrähten tritt eine kleine, durch mikroskopische Ablesung meßbare Verschiebung des Flüssigkeitsfadens ein, welche einer aus dem Steigungswinkel der Kapillare sich ergebenden Steighöhe entspricht. Uebereinstimmend mit den bei Diaphragmen gefundenen Gesetzmäßigkeiten war auch hier die Steighöhe p proportional der angelegten Spannung e und proportional der Länge der Kapillare d (entsprechend der Diaphragmendicke). Ein neues Moment für die Untersuchung gab hier die Weite der Kapillare: die Steighöhe fand sich dem Quadrat des Radius der Kapillare umgekehrt proportional. Daß die Angriffsfläche für die bewegende Kraft aber ausschließlich die Wandschicht ist, geht daraus hervor, daß mit Vergrößerung dieser Wandschicht durch Einschieben eines Glasstabes in die weiteren Kapillaren die Steighöhe sehr stark vergrößert wurde.

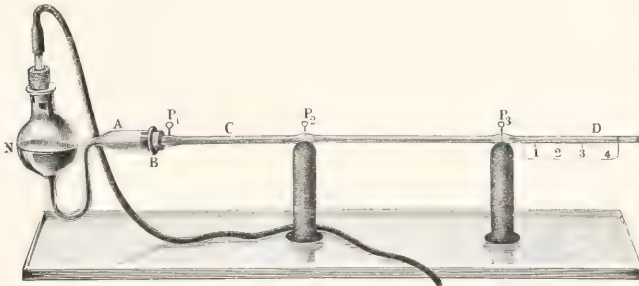


Fig. 5.

β) Elektrophorese des festen Stoffes. Bei suspendierten festen Teilchen ist unabhängig von dem gesondert zu besprechenden Ladungssinn nur die Wanderungsgeschwindigkeit untersucht worden. Sie ist für das gleiche Stoffpaar fest-flüssig proportional der wirkenden äußeren elektromotorischen Kraft gefunden worden, also unabhängig von der Größe und der Form der suspendierten Teile. Die Wanderungsgeschwindigkeit hat häufig annähernd dieselbe Größe wie diejenige größerer Ionen.

3. Theorie. Die Theorie der Erscheinungen nimmt ihren Ausgang von der Anschauung, daß an der Berührungsstelle zweier differenter Stoffe eine elektrische Doppelschicht vorhanden ist, deren einer Teil in den einen und deren anderer Teil in den anderen Stoff fällt. Werden die Teile dieser Doppelschicht mechanisch getrennt, so können die Ladungen wie bei der Reibungselektrisiermaschine räumlich getrennten Stellen zugeführt werden: man erhält eine Potentialdifferenz. Wird andererseits durch eine äußere elektrische Kraft der eine — leichter bewegliche — Teil der Doppelschicht angezogen oder abgestoßen, so findet eine mechanische Bewegung des stofflichen Trägers der Ladung statt. Bei der Berührung von Glas und Wasser erweist sich das Glas als negativ, das Wasser als positiv geladen. Führt man in die Anordnung der Figur 6 Platindrähte als Elektroden in das Wasser ein, so würde die dem Glas anliegende positive Randschicht von der negativen Elektrode angezogen werden. Eine Bewegung dieser Schicht kann aber nicht wahrgenommen werden, da ja in der von Ladungen

freien Mitte ebensoviel Wasser zurückfließt, als am Rande hinwandert. Macht man jedoch das Rohr so eng, daß die mittlere Schicht von der Randschicht durch Reibung mitgezogen

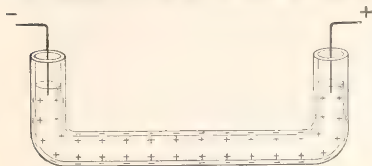


Fig. 6.

wird, so muß eine Bewegung der Flüssigkeit als Ganzes eintreten: In Kapillarröhren findet eine Bewegung des Wassers als Ganzes statt. Ganz entsprechend wird beim mechanischen Durchdrücken von Wasser durch eine Kapillare dessen positive Ladung der einen Elektrode zugeführt, während immer neues Wasser positive Ladung annimmt und die entsprechende negative Ladung an der anderen Seite zurückbleibt.

Die mathematische Formulierung der Theorie gab Helmholtz für den Fall von Kapillarröhren, für die das Poiseuillesche Gesetz gilt. Die Erweiterung auf Röhren von beliebiger Gestalt führte Smoluchowski durch. Das Folgende schließt sich an eine vereinfachte Darstellung von Perrin an.

In einer Kapillare bewegt sich die Flüssigkeit durch Elektrophorese bei konstantem Niveau an den Enden, also ohne hydrostatischen Gegendruck. Die Geschwindigkeit sei v. Die eine Ladung hafte an der festen Wand; die andere, der Flüssigkeit angehörige kann eine gewisse Ausdehnung haben infolge der Molekularbewegung, welche den Ort der geladenen Teilchen beständig verändert. Sie wirkt ebenso wie ein unendlich dünner Streifen von gleicher Ladung und in einem Abstand d von der festen Wand, der sich mit der gleichförmigen Geschwindigkeit v bewegt und mit der gleichen Geschwindigkeit die ganze innere Flüssigkeit mitzieht, auf welche keine Gegenkraft wirkt.

Ist die Flüssigkeit einmal in Bewegung, so hat die elektrische Kraft lediglich die Kraft der Reibung zu überwinden. Die auf die Flächeneinheit wirkende elektrische Kraft ist das Produkt aus der Ladung σ der Flächeneinheit und dem Potentialgefälle H, also $\sigma . H$. Die Kraft der Reibung ist das Produkt aus der reibenden Fläche (der Flächeneinheit), dem Geschwindigkeitsgefälle und dem Reibungskoeffizienten. Das Geschwindigkeitsgefälle ist hier die relative Geschwindigkeit, d. i. die Geschwindigkeitsdifferenz v der beiden parallelen, um den kleinen Abstand d voneinander entfernten Schichten, als Reibungskoeffizient wird derjenige der inneren Reibung der Flüssigkeit, η, eingeführt in der Annahme, daß auch bei der Elektrophorese, gerade wie beim Strömen der Flüssigkeit durch Röhren eine unbewegliche Schicht an der Wand haftet. Die Kraft der Reibung, das ist die Kraft, mit welcher die beiden im Abstand d befindlichen Schichten durch die Reibung aufeinander beschleunigend bezw. verzögernd einwirken, ist also $1 . \frac{v . \eta}{d}$. Also

$$\sigma H = \frac{v}{d} . \eta .$$

Ist ferner φ das in der Zeiteinheit hindurchgeführte Volumen der Flüssigkeit, dann ist die Geschwindigkeit gegeben durch $\pi r^2 v = \varphi$ und daher

$$\sigma d = \frac{\eta}{\pi r^2} . \frac{\varphi}{H} .$$

Zwischen den beiden Seiten der Doppelschicht, also der unbeweglichen und der bewegten Schicht bestehe die Potentialdifferenz ε. Nach einem bekannten Satze der Elektrostatik (vgl. den Artikel „Elektrisches Feld" 19) ist $\varepsilon = \frac{1}{K} 4\pi\sigma d$, worin K die Dielektrizitätskonstante der Flüssigkeit darstellt. Dies eingesetzt ergibt:

$$\varepsilon = \frac{4\pi}{K} . \frac{\eta}{\pi r^2} . \frac{\varphi}{H} ,$$

also die in der Zeiteinheit übergeführte Menge

$$\varphi = \frac{\varepsilon . H . \pi r^2 . K}{4\pi . \eta} .$$

Tritt an die Stelle einer Einzelkapillare ein poröses Diaphragma — gleich einem Bündel von n-Röhren mit dem Radius r — vom Gesamtquerschnitte s, und ergibt dies in der Zeiteinheit die Ueberführung eines Flüssigkeitsvolumens Φ, so wird

$$\Phi = \frac{\varepsilon . H . s . K}{4\pi\eta} .$$

Das Potentialgefälle H ist gleich der angelegten äußeren elektromotorischen Kraft E dividiert durch den Elektrodenabstand l, daher

$$\Phi = \frac{\varepsilon . E . s . K}{4\pi\eta l} .$$

Um den von Wiedemann empirisch gefundenen Zusammenhang von Φ mit der Stromstärke J daraus abzuleiten, setzt man E = Jw und für den Widerstand w den Quotienten aus der Länge der Flüssigkeitssäule l und dem Produkt aus dem Querschnitt s und der spezifischen Leitfähigkeit $\varkappa$; dann ist

$$\Phi = \frac{\varepsilon . J . l . s . K}{4\pi . \eta . l . s . \varkappa} = \frac{\varepsilon . J . K}{4\pi . \eta . \varkappa}$$

d. h. die übergeführte Menge ist proportional der Stromstärke oder der Wiedemannsche Koeffizient $\frac{\varphi}{J}$ ist für dieselbe Flüssigkeit, d. h. bei gleichbleibenden ε, K, η, $\varkappa$ konstant. Man ersieht ferner, daß bei gleichbleibender Stromstärke die übergeführte Menge Φ unabhängig ist vom Querschnitt und von der Länge der Kapillaren.

Betrachtet man nicht den Vorgang der Flüssigkeitsüberführung, sondern den stationären Zustand, welcher sich beim elektrophoretischen Emportreiben der Flüssigkeit dadurch einstellt, daß die durch die Schwere im Inneren pro Sekunde herabfließende Menge gleich ist der am Rande emporgeführten, so ergibt sich die Beziehung zwischen der sich einstellenden Steighöhe bezw. (unter Berücksichtigung des spezifischen Gewichts der Flüssigkeit) dem Enddruck P und der emportreibenden elektromotorischen Kraft E. Es war

$$\Phi = \frac{\varepsilon . H . \pi r^2 . K}{4\pi\eta} = \frac{\varepsilon . E . r^2 . K}{4\eta l}.$$

Diese Menge muß gleich sein der unter dem Drucke P herabfließenden Menge. Diese ist nach dem Poiseuilleschen Gesetz: $\frac{\pi . P . r^4}{8\eta l}$, mithin:

$$\frac{\varepsilon . E . r^2 . K}{4\eta l} = \frac{\pi . P . r^4}{8\eta l}$$

$$P = \frac{2 . \varepsilon . E . K}{\pi . r^2}.$$

Die Steighöhe einer Flüssigkeit ist also in derselben Kapillare, d. i. bei konstantem ε, K und r proportional der angelegten elektromotorischen Kraft, in Röhren von verschiedener Weite umgekehrt proportional dem Quadrat des Radius.

Das Entsprechende ergibt sich für die Strömungsströme. Die Theorie der Flüssigkeitsströmung in Röhren liefert für die Geschwindigkeit v einer Flüssigkeitsschicht, die um den sehr kleinen Abstand d von der Wand entfernt ist, den Ausdruck:

$$v = \frac{r . p}{2\eta . l} . d.$$

Die gleichförmige Bewegung dieser Schicht erzeugt, wenn σ wie oben die Ladung der Flächeneinheit ist, den Konvektionsstrom

$$2\pi r . v . \sigma = \frac{\pi r^2 . p}{\eta . l} \sigma d = K\varepsilon \frac{\pi r^2 . p}{4\pi\eta . l}.$$

Diesem Strom wird nach Eintritt des stationären Zustandes das Gleichgewicht gehalten von dem durch den inneren Teil fließenden Leitungsstrom, dessen Stärke bestimmt ist durch die von dem ersten erzeugte elektromotorische Kraft E und den spezifischen Widerstand der Flüssigkeit $\varkappa$, dem Querschnitt πr^2 und der Länge l des Flüssigkeitsfadens. Es ist also

$$\frac{E . \pi r^2}{\varkappa . l} = K\varepsilon \frac{\pi r^2 . p}{4\pi\eta . l}$$

$$E = K\varepsilon \frac{p . \varkappa}{4\pi\eta}$$

d. h. die elektromotorische Kraft des Strömungsstroms ist für ein gegebenes Stoffpaar, also gegebenes ε und K proportional dem treibenden Druck. Sie ist unabhängig von der Dicke des Diaphragmas, also der Länge der Kapillaren und von deren Durchmesser.

Ganz analog ergibt sich die Geschwindigkeit der Elektrophorese suspendierter Teilchen, wie z. B. Freundlich im Anschluß an Perrin abgeleitet hat. Denkt man sich in einer Kapillare einen kleinen festen Zylinder, so wird die ihn umgebende ringförmige Flüssigkeitsschicht durch die elektrische Kraft H fortgeführt mit der Geschwindigkeit v, die sich aus der Kombination der beiden oben hergeleiteten Gleichungen ergibt: $\varphi = \pi r^2 v$ und $\varphi = \frac{\varepsilon . H . \pi r^2 . K}{4\pi\eta}$

$$v = \frac{\varepsilon . H . K}{4\pi\eta}.$$

Ist der kleine Zylinder beweglich, so wird er sich mit derselben Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung bewegen. Man kann so z. B. das aus der Elektrophorese von Wasser in Glaskapillaren abgeleitete ε in diese Gleichung einsetzen und daraus die Geschwindigkeit von suspendierten Glasteilen in Wasser ableiten, was zuerst Smoluchowski ausgeführt hat. Die Formel entspricht ferner der oben angeführten Erfahrung, daß die Geschwindigkeit der suspendierten Teilchen unabhängig ist von ihrer Größe und Form.

Alle früher angeführten empirisch gefundenen Gesetzmäßigkeiten erweisen sich somit als Forderungen der Theorie. Die Theorie geht über das empirisch Gefundene hinaus mit der Angabe, daß die übergeführte Menge bei der Elektrophorese bezw. die elektromotorische Kraft bei den Strömungsströmen noch proportional ist dem Potentialsprung ε zwischen bewegter und unbewegter Schicht und außerdem der Dielektrizitätskonstanten K der Flüssigkeit, aber umgekehrt proportional deren innerer Reibung η. In allen diesen Elementen stecken Hypothesen. Setzt man als Reibungskoeffizienten η den der inneren Reibung der Flüssigkeit ein, so liegt darin die Annahme, daß ebenso wie bei den Bestimmungen der inneren Reibung die Flüssigkeit sich gegen eine an der Wand festhaftende Flüssigkeitsschicht

verschiebt. Es müßte dann das Phänomen — ebenso wie die innere Reibung — von der Natur der festen Wand unabhängig sein, vorausgesetzt nur, daß vollständige Benetzung eintritt. Diese Unabhängigkeit ist aber, wie wir später sehen werden, nicht vorhanden. Ferner bietet es Schwierigkeit einzusehen, wie zwei gleichartige Schichten derselben Flüssigkeit eine Potentialdifferenz gegeneinander zeigen sollen; das aus der obigen Gleichung zu berechnende ε dürfte jedenfalls nicht die Potentialdifferenz zwischen dem festen und dem flüssigen Stoff sein. Eine zweite, eine Kontrolle ermöglichende Methode zur Bestimmung von ε hat sich bisher nicht angeben lassen. Macht man aber ad hoc die Annahme, daß die der Wand anhaftende Flüssigkeitsschicht gegen die übrige verändert sei, so wird es zweifelhaft, ob man als Dielektrizitätskonstante dieser Schicht die gewöhnliche der Flüssigkeit einführen darf.

Lamb hat die Theorie durchgeführt unter der Annahme, daß durch Elektrophorese die Flüssigkeit nicht gegen eine festhaftende Wandschicht, sondern gegen den festen Stoff selbst verschoben wird. Es sind über den dann einzuführenden Koeffizienten der äußeren Reibung nur willkürliche Annahmen möglich. Eine definitive Entscheidung der Frage ist noch nicht erfolgt.

4. Ueber den Ladungssinn bei der Berührung von Nichtleitern. Das bisher Besprochene gilt unabhängig von dem Sinn der Ladung, welche die Flüssigkeit gegen den festen Stoff annimmt. Wir haben aber bereits gesehen, daß sie sowohl positiv als negativ sein kann. Das hier auftretende Problem ist das allgemeine der Berührungselektrizität: die Elektrizitätserregung bei der Berührung differenter Stoffe mit anderen chemischen oder physikalischen Eigenschaften der Stoffe zu verknüpfen, um so über den Sinn der entstehenden Ladungen eine Vorhersage machen zu können. Das über den Ladungssinn eines Stoffes gegen einen anderen empirisch Gefundene hatte man in den sogenannten Spannungsreihen zusammengefaßt, ohne daß daraus eine Beziehung zu anderen Eigenschaften hervorgetreten wäre. Ein Erfolg in dieser Richtung zeigte sich erst, als aus den Spannungsreihen die Dielektrika ausgesondert und die Elektrolyte gegeneinander und Metalle in Berührung mit Elektrolyten betrachtet wurden. Das Ergebnis war die osmotische Theorie des Galvanismus.

Die Phänomene der Elektrophorese und der Strömungsströme sind bei leitenden und nichtleitenden Flüssigkeiten und festen Stoffen zu erhalten. Es ist zu erwarten, daß auch hier Beziehungen, welche den Ladungssinn ergeben, eher hervortreten werden, wenn man Leiter und Dielektrika gesondert prüft und die Beobachtung, daß die in Betracht kommenden Erscheinungen um so deutlicher hervortreten, je schlechter leitende Stoffe verwendet werden, fordert dazu auf, hier die Dielektrika in den Vordergrund zu rücken. Dabei ergab sich als das Ladungsgesetz der Dielektrika der von Coehn 1898 aufgestellte Satz: Stoffe von höherer Dielektrizitätskonstante laden sich positiv bei der Berührung mit Stoffen von niederer Dielektrizitätskonstante. Der Satz konnte in weitem Umfange gerade an der Erscheinung der Elektrophorese geprüft werden. In einer Kapillare aus Glas laden sich alle Stoffe, deren Dielektrizitätskonstante größer ist als die des Glases (etwa 5,2), positiv und zeigen Kataphorese, die mit kleinerer Dielektrizitätskonstante negativ und zeigen Anaphorese. Entsprechendes ergeben Diaphragmen aus anderen nichtleitenden Stoffen und ebenso die Wanderung nichtleitender Pulver in dielektrischen Flüssigkeiten.

Eine spätere Untersuchung von Coehn und Raydt zeigte, daß das Gesetz auch quantitative Gültigkeit besitzt. Führt man nämlich die Flüssigkeit durch Elektrophorese in einer Kapillare aufwärts bis zu dem oben (S. 840) charakterisierten stationären Zustande, so ist der hydrostatische Druck gleich der elektrischen Triebkraft. Um für den hydrostatischen Druck der Flüssigkeit einfach die Steighöhe setzen zu können, wird die Beobachtungskapillare immer mit derselben Flüssigkeit beschickt und durch ein mit Quecksilber gefülltes U-Rohr von der eigentlichen Untersuchungskapillare getrennt, welche die zu prüfende Flüssigkeit und an den Enden die Elektroden enthält. Die Steighöhen für verschiedene Flüssigkeiten sind dann proportional der Differenz der Dielektrizitätskonstanten der sich berührenden Stoffe, hier also der Flüssigkeiten und des Glases. Der oben als Ladungsgesetz für Dielektrika bezeichnete Satz erfährt demnach die Ergänzung: Die Ladungsdichte der elektrischen Grenzschichten an der Berührungsfläche zweier Dielektrika ist proportional der Differenz der Dielektrizitätskonstanten der sich berührenden Stoffe. Umgekehrt hat man so in der Messung der Steighöhen durch Elektrophorese eine neue Methode zur Ermittlung der Dielektrizitätskonstanten von Flüssigkeiten.

5. Einfluß von Elektrolyten. Es ist vorauszusehen, daß die durch die Dielektrizitätskonstanten der sich berührenden Stoffe bedingten Erscheinungen eine Aenderung erfahren werden, wenn sich den dielektrischen Eigenschaften galvanische Leitfähigkeit

überlagert. Die Erfahrung hat gezeigt, daß die oben (unter 2) angeführten Gesetzmäßigkeiten durch die Anwesenheit von Ionen in der Flüssigkeit nicht beeinträchtigt werden. Die starke Aenderung, welche die Größe der Effekte durch Anwesenheit von Ionen erfahren, ist — da die Dielektrizitätskonstante und die innere Reibung dadurch nur wenig beeinflußt werden — zurückzuführen auf die Aenderung der Potentialdifferenz an der Berührungsfläche. Diese Aenderung kann bis zur Umkehr des Ladungssinnes gehen. Das Problem ist: Aus den Eigenschaften der Ionen — sei es dem Ladungssinn, sei es der Wertigkeit, der Wanderungsgeschwindigkeit, der Entladungsspannung eine Vorhersage zu machen über den Einfluß der Ionen auf die Ladung an der Berührungsfläche von Flüssigkeit und festem Stoffe.

Die Untersuchungen sind natürlich zumeist an wässerigen Lösungen ausgeführt worden. Die festen Stoffe wurden dabei in Form von Diaphragmen oder von Suspensionen verwendet. Sind sie Nichtleiter, so laden sie sich, entsprechend ihrer Dielektrizitätskonstante, gegen reines Wasser sämtlich negativ. Eine Reihe von Stoffen, die entweder metallisch leiten oder in Wasser Ionen abgeben, so verschiedene Oxyde, Chloride, Sulfide zeigen in Wasser suspendiert positive Ladung. Eine größere von Perrin herrührende Untersuchungsreihe verwendet die festen Stoffe als Diaphragmen und prüft die Ueberführung von Wasser und wässerigen Lösungen mit dem Ergebnis, daß Wasserstoff- und Hydroxylionen besonders ausgesprochenen Einfluß zeigen. Die gegen Wasser negativen Diaphragmen behalten bei Zufügen von wenig OH-Ionen zum Wasser ihren Ladungssinn, während Spuren von Säuren, also des positiven $\overset{+}{\text{H}}$-Ions, Abnahme der negativen Ladung des Diaphragmas und weiterer Säurezusatz Umkehr des Ladungssinnes bewirken. Umgekehrt verhalten sich die gegen reines Wasser positiven Diaphragmen. Für beide Fälle läßt sich also eine Lösung finden, welche weder Kataphorese noch Anaphorese gegen das Diaphragma zeigt, die also den Nullpunkt des Potentialsprunges zwischen Lösung und festem Stoff darstellen würde. Für die Wirkung anderer Ionen kommt Perrin zu dem Ergebnis, daß negative Ionen auf positiv geladene Diaphragmen und umgekehrt entladend wirken und daß die entladende Wirkung um so größer ist, je höher die Wertigkeit des Kations bezw. Anions in der Lösung ist. Diese Regeln werden jedoch nicht quantitativ bestätigt und sie gelten auch nicht ausnahmslos. Offenbar besteht ein Zusammenhang mit der Fähigkeit der Ionen, suspendierte Teilchen und Kolloide zur Ausfällung zu bringen (vgl. darüber den Artikel „Adsorption“). Es ist zu erwarten, daß eine einwandfreie Theorie des einen Erscheinungsgebietes auch die des anderen bringen wird.

Die Deutung des Einflusses der Ionen ist auf verschiedenen Wegen versucht worden. Ein Deutungsversuch nimmt an, daß der feste Stoff eine elektrolytische Lösungstension besitzt und daß demnach die sich ausbildende Potentialdifferenz an der Grenzfläche gegeben sei durch die Nernstsche Formel $E = RT\ln\frac{C}{c}$ (vgl. den Artikel „Galvanische Ketten“). Dann müßte der Nullpunkt dieser Potentialdifferenz mit dem durch die Lösungstension und Ionenkonzentration bestimmten identisch sein. Es zeigt sich jedoch, daß z. B. der von Billiter beim Durchfallen von Silber durch Lösungen von verschiedener Silberionenkonzentration gefundene Nullpunkt ein ganz anderer als der zu erwartende ist und daß er insbesondere gar nicht von der Silberionenkonzentration abhängt. Aehnliche Einwände sind gegen die Anschauung zu erheben, welche die feste Glaswand als Wasserstoffelektrode auffaßt, wonach die Elektrolyte nach Maßgabe ihrer $\overset{+}{\text{H}}$-Ionenkonzentration wirksam sein müßten.

Ein anderer Erklärungsversuch geht von der Tatsache aus, daß feste Stoffe gegenüber Elektrolyten häufig eine selektive Adsorption zeigen. Die verschiedene Adsorbierbarkeit von Kation und Anion kann so zu einer Adsorptionspotentialdifferenz führen. Die Ansicht wurde von Freundlich vertreten, mußte aber aufgegeben werden, als er gemeinsam mit v. Elissafoff bei der näheren Prüfung fand, daß die Aufladung durch eine Reihe von Ionen, insbesondere von Anionen nicht die nach ihrer Adsorbierbarkeit zu erwartende ist. Die Anschauung wurde dahin modifiziert, daß die Aufladung dadurch zustande kommt, daß der feste Körper, aus dem die Wand besteht, sich wie ein schwerlösliches Salz verhält und daß seine Ionen verschieden große Lösungstension haben.

Man sieht, daß alle diese Auffassungen es unternehmen, die ursprüngliche Entstehung des Potentialsprungs an der Berührungsstelle mit Hilfe der Ionen zu erklären. Es scheint aber, daß die Eigenschaften der Ionen lediglich heranzuziehen sind, um den Einfluß vorhandener Ionen auf die ursprüngliche Aufladung zu deuten, welche zwei differente Nichtleiter gegeneinander annehmen und von der wir gesehen haben, daß sie der Differenz der Dielektrizitätskonstanten proportional ist. Diese Aufladung der Nichtleiter gegeneinander ist

aber ein Phänomen sui generis, dessen Ursache vermutlich nicht auf Ionen zurückzuführen ist. Es sei hier daran erinnert, daß Boltzmann es für angezeigt hält, den Erscheinungen des Galvanismus als wesensverschieden diejenigen des Guerickismus gegenüberzustellen. Beiden würde ein anderer Nullpunkt der Potentialdifferenz bei der Berührung verschiedener Stoffe entsprechen: der eine, dessen Lage durch die Lösungstension und Ionenkonzentration gemäß der Nernstschen Formel bestimmt ist, der andere, der gegeben ist bei Gleichheit der Dielektrizitätskonstanten der sich berührenden Stoffe. Dieser zweite ist es, welcher durch die Anwesenheit von Ionen auf noch näher zu erklärende Art überdeckt wird.

6. Technische Anwendungen. Man hat zahlreiche Vorschläge zur technischen Verwendung der Elektrophorese gemacht. Versuche von Graf Schwerin haben zum Ziel, nassen Torfmassen das Wasser dadurch zu entziehen, daß man sie als Diaphragma zwischen übereinander angeordneten durchlöcherten Metallplatten benutzt, die untere zur Kathode macht und das dahin übergeführte Wasser abtropfen läßt. Auch zur Reinigung des Wassers von Suspensionen und kolloidalen Teilen hat man die Elektrophorese heranziehen wollen. In beiden Fällen dürfte eine Schwierigkeit bei der Durchführung darin liegen, daß das zu bearbeitende Wasser nicht genügend elektrolytfrei ist, daß aber der angestrebte Zweck um so schlechter erreicht wird, je mehr leitende Bestandteile im Wasser sind. Ein weiterer Vorschlag will die Elektrophorese für die Gerbung des Leders nutzbar machen, indem dadurch die Gerbflüssigkeit durch die Poren des Leders hindurchgepreßt werden soll.

7. Die Elektrostenolyse. Als Elektrostenolyse bezeichnete F. Braun die in engen Kapillaren bei Stromdurchgang erfolgende Abscheidung von Metallen aus ihren Salzlösungen. Die Erscheinung ist leicht demonstrierbar in der Anordnung der Figur 7.

Ein geeignetes Diaphragma wird so hergestellt, daß man ein Glasrohr zuschmilzt und noch heiß rasch durch einen Wasserstrahl führt, wobei zahlreiche feine Sprünge entstehen. Dies Rohr wird mittels Gummischlauchs an das obere h-förmige Glasrohr angesetzt und in einen zur Projektion geeigneten Trog gesenkt. In diesem, sowie in den Glasröhren befindet sich eine verdünnte Lösung, z. B. von Silbernitrat. An die zu beiden Seiten des Spaltes befindlichen Platindrähte ist eine Spannung von etwa 50 Volt in dem aus der Figur ersichtlichen Sinne angelegt. Man erkennt sogleich bei Stromschluß die Abscheidung von Silberkristallen an dem Spalt.

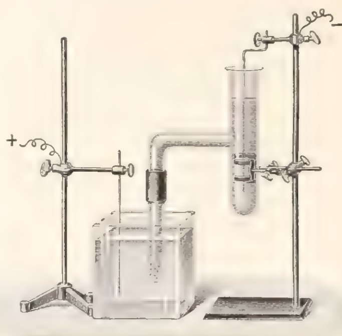


Fig. 7.

Den Zusammenhang der Elektrostenolyse mit dem hier behandelten Erscheinungsgebiet zeigte Coehn. Die Deutung des Phänomens ist darin zu sehen, daß, wie wir bei der Elektrophorese erkannt haben, in den Kapillaren die Glaswand negativ geladen ist. Sie übt eine Anziehung auf die positiv geladenen Metallionen der Lösung aus. Würden diese sich aber abscheiden, so könnten sie unter gewöhnlichen Umständen dennoch nicht zu einer sichtbaren Menge anwachsen. Denn schiede sich z. B. aus Kupfersulfat an der Kapillare eine minimale Spur von Kupfer aus, so würde dieses Kupfer sofort einen „Mittelleiter" bilden, der an seinem anodischen Ende um ebensoviel abnehmen, als am kathodischen Ende zunehmen, im ganzen also nicht wachsen würde. Das Anwachsen aber muß stattfinden, wenn die kathodische Zunahme ohne anodische Abnahme erfolgt. Das trifft zu:

a) Wenn das negative Radikal das abgeschiedene Metall nicht angreift, wie bei Platinsalzen.

b) Im Falle der Bildung von unlöslichen Verbindungen, insbesondere von Superoxyden an der Anode, wie bei Bleisalzen.

c) Bei Oxydulsalzen, deren negatives Ion auf die Lösung unter Bildung einer höheren Oxydationsstufe einwirken kann, wie bei Cupro- und Ferrosalzen.

Silbernitrat bildet z. B. bei der hohen Stromdichte anodisch Superoxyd, zeigt also Stenolyse; Kaliumsilbercyanid, welches anodisch Silber quantitativ löst, zeigt das Phänomen nicht.

Von Kobalt- und Nickelsulfat wurde gefunden, daß nur das erste Stenolyse ergab. Daraus wurde der Schluß gezogen, daß nur

aus dieser Lösung sich das Metall als Superoxyd abscheidet, nicht aber aus Nickelsulfat. Der Versuch bestätigte diesen Schluß.

Literatur. *Zu* 1 *und* 2: ***G. Wiedemann,*** *Ann. d. Phys.* 87, *321, 1852.* — ***G. Quincke,*** *ebda.* 107, *1. 1859;* 110, *38, 1860;* 113, *513, 1861.* — ***E. Dorn,*** *ebda.* 5, *20, 1878;* 8, *119, 1879;* 9, *513, 1880;* 10, *46, 1880;* 12, *149, 1881.* — *Vgl. auch* ***Grätz*** *in Winckelmanns Handb. d. Phys. IV, 1, 940.* — ***Freundlich,*** *Kapillarchemie. Leipzig 1909.*

Zu 3: ***H. v. Helmholtz,*** *Ann. d. Phys.* 7, *373, 1879. Ges. Abh. I, 855.* — ***H. Lamb,*** *Phil. Mag.* 25, *52, 1888.* — ***M. Smoluchowski,*** *Ber. d. Krakauer Akademie 1903, 182.*

Zu 4: ***A. Coehn,*** *Ann. d. Phys.* 64, *217, 1898.* — ***A. Coehn und U. Raydt,*** *ebda.* 30, *777, 1909.*

Zu 5: ***J. Perrin,*** *Journ. de chim. phys.* 2, *601, 1904;* 3, *50, 1905.* — ***Billiter,*** *Ann. d. Phys.* 11, *937, 1903.* — ***Freundlich und Mäckelt,*** *Zeitschr. f. Elektrochem.* 15, *161, 1909.* — ***R. Ellis,*** *Zeitschr. f. physikal. Chem.* 78, *321, 1911.* — ***G. v. Elissafow,*** *ebda.* 79, *385, 1912.*

Zu 6: ***Graf B. Schwerin,*** *D.R.P. 124430, 124509, 124510, 128085 u. a.*

Zu 7: ***F. Braun,*** *Ann. d. Phys.* 42, *450, 1891;* 44, *470, 1891.* — ***A. Coehn,*** *Zeitschr. f. physikal. Chem.* 25, *651, 1898.*

A. Coehn.

Sturm

Jakob.

Geboren am 21. März 1771 in Nürnberg. Er widmete sich frühzeitig der Kupferstecherei und war bereits mit 16 Jahren erfolgreich als naturwissenschaftlicher Illustrator tätig. Dies veranlaßte ihn, sich dem Studium der Natur als eifriger Sammler zu widmen und sein Darstellungstalent außer in der Mitarbeit an fremden auch in eigenen Abbildungswerken zu betätigen. So entstand sein vorzüglichstes Werk „Deutschlands Flora in Abbildungen nach der Natur mit Beschreibungen" mit 2472 kolorierten Tafeln (1798 bis 1855, nach des Verfassers Tode von seinem Sohne Johann Wilhelm Sturm fortgeführt), an dessen Text neben dem Herausgeber zahlreiche Botaniker mitarbeiteten. Ein zoologisches Seitenstück hierzu stellt seine „Deutschlands Fauna" dar (1805 bis 1857). 1846 wurde er Dr. phil. hon. c. und starb in Nürnberg am 28. November 1848.

W. Ruhland.

Sturm

Jakob Karl Franz.

Geboren am 29. September 1803 in Genf, gestorben am 18. Dezember 1855 in Paris. Er war Hauslehrer in Genf, wurde 1830 Professor der Mathematik am Collège Rollin in Paris, 1838 Repetent, 1840 Professor der Analyse an der Ecole polytechnique, nach Poissons Tod Professor der Mechanik an der Faculté des Sciences. Gemeinsam mit Colladon maß er die Kompressibilität der Flüssigkeiten und bestimmte die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Wasser.

E. Drude.

Stützsubstanzen.

Allgemeine Bemerkungen. Begriffsbestimmung. I. Bindegewebe und Bindesubstanzen. 1. Zelliges Bindegewebe. 2. Fettgewebe. 3. Schleimgewebe. 4. Fibrilläres Bindegewebe. 5. Reticuläres Bindegewebe. II. Stützgewebe und Stützsubstanzen im engeren Sinne. A. Stützgewebe. 1. Chordagewebe. 2. Knorpelgewebe. 3. Knochengewebe. B. Stützsubstanzen. 1. Spongin. 2. Elastoidinfäden. 3. Spicula, Nadeln. III. Epidermale und cuticulare Stützgebilde und Stützsubstanzen. 1. Chitin. 2. Verkalktes Chitin. 3. Zellulose. 4. Schalen. 5. Horn. 6. Kalk.

Allgemeine Bemerkungen. Begriffsbestimmung. Unter Stützsubstanzen im weitesten Sinne verstehen wir „alle bestimmt geformten Zellverbände und Zellprodukte oder die Zellverbände mit ihren Produkten organischer, anorganischer oder gemischter Natur zusammen als Einheit, welche im Innern des Tierkörpers liegen oder die Oberfläche bedecken und welche zur Ausfüllung von Körperhöhlen, zur Verbindung einzelner Organe, zur Stützung und zum Schutz des ganzen Organismus dienen". Bei höher stehenden Gruppen (Gliedertiere, Wirbeltiere) finden die Stützsubstanzen außerdem Verwendung bei der Bewegung des Körpers.

Der Begriff „Stützsubstanz" wird folglich a) sowohl im Sinne des Chemikers gebraucht, indem darunter eine chemisch genau charakterisierte organische oder anorganische Substanz verstanden wird (z. B. Chitin, Keratin, Ossein, kohlensaurer-phosphorsaurer Kalk). b) im Sinne des Histologen, indem man darunter ein bestimmt geformtes Gewebe mit seinen Produkten versteht (z. B. Knochen-, Knorpelgewebe), c) in anatomisch-morphologischem Sinne, indem man die Stützgebilde in erster Linie im Auge hat (z. B. die Knochen, die Schalen, die Skelette), d) in physiologem Sinne, indem man Bezug auf die Funktion nimmt (z. B. Stütz-, Schutz-, Binde- und Bewegungsfunktion).

Der ungeheueren Mannigfaltigkeit der Tierkörper entspricht auch die der Stützsubstanzen sowohl ihrer äußeren Morphologie nach als auch in histologischer und chemischer Hinsicht. Erklärlich ist es daher, daß auch in der Nomenklatur keine Einigung erzielt wurde und die verschiedensten Bezeichnungen gebraucht werden oder die-

selben Bezeichnungen ganz Verschiedenes ausdrücken können, je nachdem man vom chemischen, histologischen, morphologisch-anatomischen oder physiologischen Standpunkt aus die „Stützsubstanzen“ behandelt.

So findet man in der Literatur folgende Bezeichnungen: Bindegewebe (Tela conjunctiva s. connectiva Joh. Müller); Bindesubstanz (Kölliker); Bindesubstanzgewebe (Reichert); Baugewebe (Tela tectonica Studnička); Stützgewebe (tela sceletalis Gegenbaur); Stützsubstanzen; bindegewebige Stützsubstanzen usf.

Da Stützsubstanzen nach Bau, Genese und Funktion verschieden sind, so ist die Art der Bezeichnung nicht immer scharf zutreffend. Es liegen mehrere Versuche vor, die Stützsubstanzen zu klassifizieren und unter besonderer Berücksichtigung des Baues und der Genese neue Bezeichnungen aufzustellen, aber eine allgemein anerkannte Einteilung ist noch nicht gelungen. Endlich kommt noch hinzu, daß durch neuere Untersuchungen alte Auffassungen über die Natur der einen oder anderen Gewebsart ungültig wurden, wodurch die Unsicherheit in der Bezeichnung noch erhöht wird.

Am einfachsten ist es wohl, von „Stützsubstanzen“ und „Stützgebilden“ im Sinne des Histologen nur dann zu sprechen, wenn nach definitiver Fertigstellung der Komplex zellfrei ist; von „Stützgeweben“, wenn auch im fertigen Gebilde Zellen noch vorhanden sind. Die Stützsubstanzen dienen in erster Linie zum Stützen und Schützen, die Stützgewebe zur inneren Ausfüllung und zur Bewegung.

Histologisch sind die Stütz- oder Bindegewebe dadurch charakterisiert, daß die Zellen selbst stark in den Hintergrund und die von ihnen produzierte Grund- oder Interzellularsubstanz einerseits und die darin liegenden Fibrillen (Fasern) andererseits stark in den Vordergrund treten.

Von Kittsubstanz spricht man, wenn nur wenig Interzellularsubstanz zwischen den einzelnen Zellen vorhanden ist.

Ob die Grundsubstanz und die Fibrillen auf Umbildungen oder auf Sekretion des Plasmas zurückzuführen ist, läßt sich bisweilen nicht entscheiden, beide Prozesse sind nebeneinander möglich. — Die Interzellularsubstanzen können weich und homogen sein, halb hart wie beim Knorpel und völlig hart und unschneidbar wie beim Knochen. Durch Einlagerung von anorganischen Salzen wird diese bedeutende Härte erzielt. Fibrillen sind in der Grundsubstanz je nach Art des Gewebes weit verbreitet und überwiegen in manchen Geweben.

Nach Fertigstellung des Gewebes sind die Bildungszellen bisweilen ganz verschwunden oder nur noch in Resten erhalten. In anderen Fällen bleiben die Zellen dauernd vorhanden und stehen durch feine pseudopodienähnliche Fortsätze in Verbindung. Die embryonale Bindesubstanz ist das Mesenchym, es sind dies Zellen, die aus verschiedenen Teilen des mittleren Keimblattes stammen. Ursprünglich liegen die sternplattenförmigen Mesenchymzellen locker zwischen den festgefügten Keimblättern und sind durch Ausläufer netzig verbunden. Später setzt dann der Differenzierungsprozeß ein.

Je nachdem man bei der Klassifikation vom histologischen Bau, von der chemischen Zusammensetzung, von der Genese oder von der Funktion ausgeht, kommt man zu anderen Einordnungen. Zu berücksichtigen sind dabei folgende Punkte: a) Das betreffende Gewebe dient zur Ausfüllung der Körperhöhlen und zur Verbindung der einzelnen Teile und Organe: Bindegewebe und Bindesubstanzen im engeren Sinne. Sie nehmen an der Skelettbildung nur wenig Anteil. b) Das betreffende Gewebe dient zur Ausstützung des Körpers im Innern und zur Festigung und zum Schutz an der Oberfläche. Stützgewebe und Stützsubstanzen im engeren Sinne. c) Es ist zu untersuchen, ob das Gewebe ento-, ektodermalen oder mesenchymatischen Ursprungs ist. d) Ist das Gewebe weich oder hart, verkalkt oder unverkalkt, mit oder ohne Zelleinschlüsse, wie ist die chemische Zusammensetzung? — Wir wollen in folgende 3 Gruppen einteilen unter Anlehnung an die bisher üblichen Klassifikationsversuche.

I. Bindegewebe und Bindesubstanzen.

Bindesubstanzen im engeren Sinne dienen besonders der Ausfüllung und Organverbindung. Grundsubstanz weich. Mesenchymatischen Ursprungs. Zur Skelettbildung nur in zweiter Linie herangezogen. In mannigfacher Ausbildung vorhanden. Die wichtigsten Formen sind:

1. Zelliges Bindegewebe. Die Zellen sind groß, blasig, vakuolisiert. Die Interzellularsubstanz ist nur spärlich vorhanden als sogenannte Kittsubstanz und bildet membranartige Wände zwischen den Zellen. Zu finden z. B. bei Hydroiden in den soliden Tentakeln; bei Mollusken, Arthropoden (Fig. 1).

2. Fettgewebe. Es schließt sich im Bau an voriges an. Innerhalb der Zellen bilden sich Fettkugeln, die die Zelle auftreiben und das Plasma als dünne periphere Schicht zeigen. In der Grundsubstanz können Fibrillen vorhanden sein. Im erkalteten Zustande kristallisieren vielfach Fettkristalle aus. Bei Arthropoden und Vertebraten (Fig. 2).

3. Schleim- oder Gallertgewebe. Die Interzellularsubstanz ist sehr weich, weißlich durchsichtig und außerordentlich wasserreich. Die Zellen sind sternförmig oder rund-

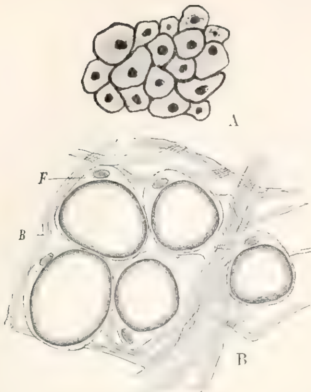


Fig. 1. A Zelliges Bindegewebe; die dunkleren Linien deuten die Kittsubstanz an. Schematisch. B Fettgewebe mit Fibrillen. F Fettzellen. B Bindegewebsfibrillen. Nach Ranvier.

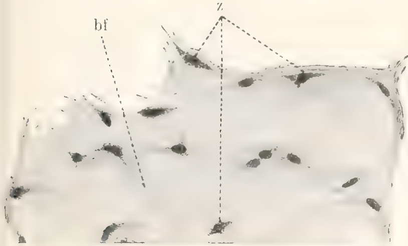


Fig. 2. Gallertiges Bindegewebe mit feinen Fibrillen bf in der Grundsubstanz, z Zellen. Aus dem Nabelstrang des Menschen. Nach Sobotta.

lich und oft durch Fortsätze verbunden. Lagern sich noch Fasern und Faserbündel ein, so wird das Gewebe fester. Beim Menschen trifft man Gallertgewebe im Nabelstrang mit feinsten Fibrillen, sonst ist es bei den großen Medusen, Ctenophoren, Heteropoden weit verbreitet (Fig. 2).

4. Fibrilläres, faseriges Bindegewebe. In die durchsichtige Grundsubstanz sind Fasern einzeln oder in Bündeln, parallel oder sich kreuzend eingelagert. Die Zellen (fixe Bindegewebszellen) sind spindelförmig sich verästelnd und außerdem kommen hier noch sogenannte Mast- und Wanderzellen vielfach vor.

Sind die Fasern alle parallel, so spricht man von straffem Bindegewebe, im anderen Falle von lockerem Bindegewebe.

Man kennt 2 Arten von Fibrillen: a) die kollagenen Fibrillen, sie sind sehr dünn, ½ bis 1 μ, doppelbrechend, geben beim Kochen Leim (Glutin, Kollagen) und quellen stark in Säuren und Alkalien, b) die elastischen Fibrillen, sie sind von wechselnder Dicke ½ bis 10 μ, liegen nicht in Bündeln, geben keinen Leim, verbinden sich netzartig, rollen sich spiralig ein beim Durchreißen, lösen sich nicht in Säuren und Alkali, bestehen aus Elastin. In den Arterien der Wirbeltiere verflechten sie sich zu siebartigen, häutigen Platten (Membranae fenestrae). Ueberwiegen die elastischen Fasern bei weitem, z. B. im Nackenband der Rinder, so spricht man von elastischen Bindegewebe. Obwohl das fibrilläre, kollagene Bindegewebe oft sehr elastisch ist, fehlen die echten elastischen Fasern vielfach. — Das faserige Bindegewebe findet sich bei fast allen Tiergruppen (Fig. 3).



Fig. 3. Fibrilläres Bindegewebe. c Bindegewebszelle, e elastische Fasern netzförmig verbunden, f kollagene Fasern. Nach Boas.

5. Retikuläres (adenoides) Bindegewebe. Man trifft es in den Lymphdrüsen der Säuger. Es ist ein weitmaschiges Netz von anastomosierenden Zellen, die feine Fibrillen produzieren. Die Lücken des Netzes füllen die Lymphdrüsenzellen aus (Fig. 4).

II. Stützgewebe und Stützsubstanzen im engeren Sinne.

Diese dienen besonders zur Aussteifung des Körpers im Inneren und tritt vielfach in engste Beziehung zum aktiven Bewegungsapparat, den Muskeln. Die Grundsubstanz ist halb hart, noch schneidbar (z. B. beim Knorpel) und völlig hart durch mineralische Einlagerungen (z. B. beim Knochen). Mesodermalen oder entodermalen Ursprungs. Hierher sind auch die „reinen“ Stützsubstanzen, organischer oder anorganischer Natur

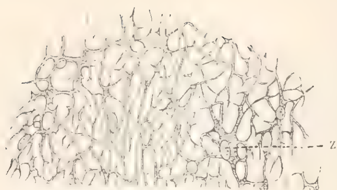


Fig. 4. Retikuläres Bindegewebe. z die Bindegewebszellen mit Fortsätzen ein maschiges Netz bildend. Nach Gegenbaur.

zu rechnen, die besonders bei Wirbellosen vorkommen (Kalk- und Kieselnadeln, Spongin). Die wichtigsten Formen sind:

A. Stützgewebe.

1. Chordagewebe. Ueber die Natur dieses Gewebes sind die Meinungen noch geteilt. Die einen halten es für zelliges Bindegewebe (I, 1), die anderen für einen besonderen Gewebstypus. (Schaffer, Studnička, Anat. Anz. 37, 38, 39.) Es kann lamellös sein wie beim Amphioxus, oder blasig vakuolisiert mit sehr geringer Grundsubstanz. Da die Hauptfunktion die Stützung ist und es andererseits genetische Beziehungen zum Knorpel zeigt, so sei es eben hier eingereiht. Bei Tunicaten, Acraniern, Vertebraten.

2. Knorpelgewebe. Die Grundsubstanz (Chondrin) ist reichlich vorhanden, fest, aber noch schneidbar. Die Zellen sind rundlich oder durch feine Ausläufer verbunden. Feinste kollagene Fasern sind vorhanden, besitzen aber gleiche Lichtbrechung wie die Interzellularsubstanz und können nur durch besondere Methoden sichtbar gemacht werden. Man unterscheidet nach dem Verhalten der Fasern: a) Hyalinen Knorpel. Die Grundsubstanz ist weißlich-bläulich. Mit kollagenen Fasern. Beim Kochen Knorpelleim (Chondrin) gebend. Die Zellen liegen in den Knorpelhöhlen, die von der Knorpelkapsel, aus verdichteter Grundsubstanz bestehend, umschlossen werden. Im Alter neigt der Hyalinknorpel zur Verkalkung, indem Kalkkrümel und -netze eingelagert werden. Für manche Tiere (Haie) ist der verkalkte Knorpel typisch. Die Außenseite des Knorpels überzieht die Nerven und gefäßführende Knorpelhaut (Perichondrium), erstere dringen in die Knorpelsubstanz selbst nicht ein. Der Hyalinknorpel des Embryonalstadiums wandelt sich in Knochen um. Dem Gelenkknorpel, der die Gelenkflächen überzieht, fehlt das Perichondrium. Bei Cephalopoden, einigen Gasteropoden und bei Wirbeltieren. b) Elastischer Knorpel (Netzknorpel). Mehr gelblich gefärbt. In der Grundsubstanz liegen dichte Netze bildend elastische Fasern. Typisch für die Ohrmuschel. c) Bindegewebsknorpel. Es finden sich dicht gelagert parallele Fasern. Die Grundsubstanz ist bis auf die Wand der Kapseln reduziert, in denen die Zellen liegen. Besonders in den Intervertebralscheiben. Die organischen Bestandteile des Knorpels enthalten Chondrin, die anorganischen besonders phosphor- und kohlensaure Calcium- und Magnesiumsalze (Fig. 5).

3. Knochengewebe (Substantia ossea). Die Grundsubstanz (Ossein) ist verkalkt, sehr fest und in ihr liegen reichlich unverkalkte kollagene Fibrillen. Der „Knochen" enthält insgesamt etwa 50% Wasser, 15% Fett, 12,5% Ossein und 22% Mineralbestandteile, die sogenannte Knochenerde. Im Ossein ist C, H, N, O, S; in der Knochenerde besonders Calcium- Magnium-Phosphat, Calciumkarbonat, Calciumfluorid und -chlorid, Alkalisalze. Die Mineralbestandteile sind mikroskopisch nicht sichtbar.

Die Knochenzellen liegen in Höhlungen (sogenannte Knochenkörper) der Grundsubstanz und sind durch sehr feine, rechtwinklig abgehende Fortsätze, sogenannte Kanälchen (Canaliculi ossium), verbunden. Um die Knochenhöhle ist eine schmale Zone sehr fester und fibrillenfreier Grundsubstanz. Man bezeichnet diese Zone als Knochenkapsel. — Im lebenden Zustand besteht der Knochen aus: a) Knochensubstanz und zwar α) aus der Substantia compacta (peripher liegend) und β) der Substantia spongiosa (zentral liegend), b) Knochenhaut oder Periost, c) Mark, d) Gelenkknorpel, die Endflächen überziehend (vgl. II, 2) (Fig. 6).

Das Knochengewebe ist lamellös gebaut, und zwar zeigt die Spongiosa einfache, die Compacta komplizierte konzentrische Lamellen. Die Spongiosa ist ohne Blutgefäße, die Compacta von einem weitverzweigten Netz durchzogen. Diese Kanäle heißen Havers'sche Kanäle, sie laufen der Längsachse des Knochens parallel und teilen sich dichotom. Um die Haversschen Kanäle sind die Lamellen konzentrisch geschichtet (Speziallamellen oder Haverssche Lamellen). Parallel zur äußeren und inneren Oberfläche laufen die Grundlamellen (Generallamellen); zwischen den Kanälen die Schaltlamellen (Interstitial Lamellen). Die einzelnen Lamellen sind durch fibrillenfreie Grundsubstanz verbunden (sogenannte Kittlinien). — Bindegewebsbündel, vom Periost ausgehend, bohren sich in die Lamellen ein und dienen zur festen Verbindung beider, man nennt sie Sharpeysche Fasern, besonders deutlich an den Nahträndern der Knochen. Die Knochenbildner bezeichnet man als Osteo-

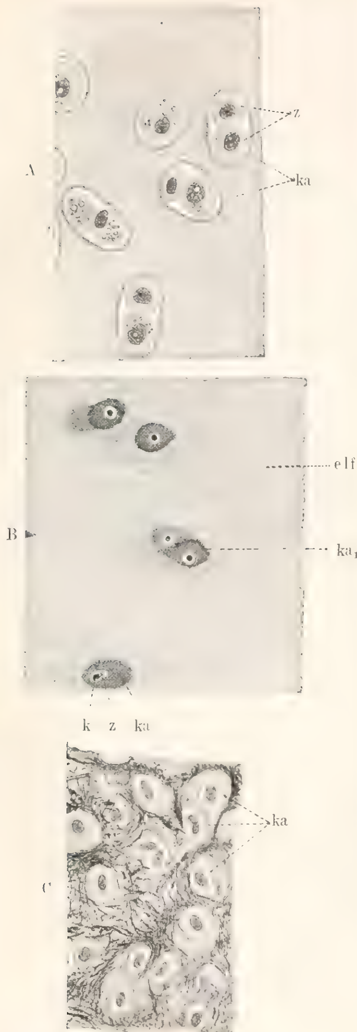


Fig. 5. A Hyalinknorpel der ; menschlichen Rippe, z Knorpelzellen zum Teil mit Fetttropfen, ka Knorpelkapsel; B Elastischer Knorpel des Ohres, elf elastische Fibrillen; C Bindegewebsknorpel, ka_1 Knorpelkapsel mit Kalkkörnchen. Nach Sobotta.

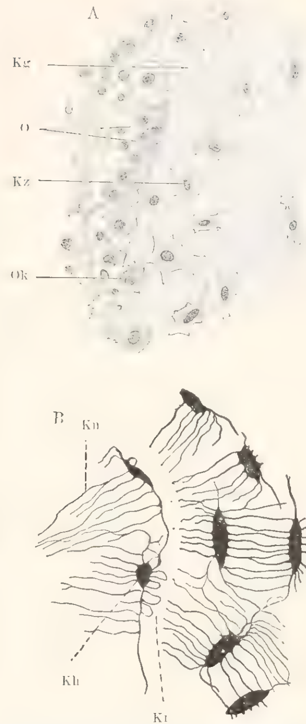


Fig. 6. Struktur und Bau des Knochengewebes. A Querschnitt des Humerus eines 4 Monate alten menschlichen Embryos. Kg Knochengrundsubstanz, O Osteoblast, Kz Knochenzelle, Ok Osteoblast zur Knochenzelle werdend. B Schliff durch trockene Knochen. Kn Knochenkanälchen, Kh Knochenhöhlen, Ki Kittlinie. Nach Stöhr.

blasten (Fig. 7). Besondere Formen des Knochengewebes zeigt das Osteoid- oder Hartgewebe. Es ist fibrillär, weiß, zellfrei, stark verkalkt. Die Knochenkörperchen fehlen, der feinere Bau ist recht verschieden. Namentlich die Fischschuppen bestehen aus Osteoidgewebe.

Eine ganz spezialisiert ausgebildete Art Knochengewebe ist das Dentin- oder Zahngewebe (auch Elfenbein) der Wirbeltiere. Es ist noch härter als Knochen und im fibrillären Teil unverkalkt, während die Grundsubstanz sehr stark verkalkt (organische Substanz etwa 30%, anorganische da-

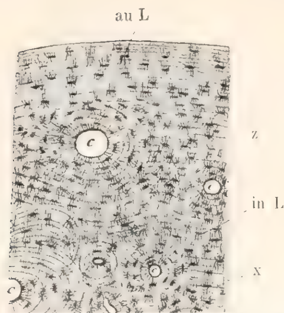


Fig. 7. Struktur und Bau des Knochengewebes. Querschliff eines menschlichen Metacarpus. c Haversche Kanäle, auL äußere, inL interstitielle Lamellen. x Grenzlinien der Lamellen. z Knochenzelle. Nach C. K. Schneider.

gegen 70%). Die dentinbildenden Zellen (Odontoblasten) zeigen Fortsätze (Zahnfasern oder Tomessche Fasern), die in feinste Röhrchen (Dentin- oder Zahnröhrchen) sich erstrecken. Ueber den feineren Bau der Tierzähne ist an anderer Stelle Näheres ersichtlich. — Das Zementgewebe an der Basis mancher Wirbeltierzähne ist ein Knochengewebe ohne lamellöse Schichtung.

Die Histogenese des Knochengewebes ist noch strittig. Früher sprach man den Knochenbildnern (Osteoblasten) die Hauptrolle zu. Nach Ansicht einiger neueren Autoren kommt diesen Zellen nur eine untergeordnete Rolle zu. Auch ist in letzter Zeit behauptet worden, der Knochen leite sich vom Ektoderm her. Es bedürfen diese Angaben nochmaliger Bestätigung. Der Zahnschmelz ist sicher ektodermal, sehr hart und hat fast nur anorganische Bestandteile. Die Struktur ist prismatisch.

Unter Hautknochen (Dermalknochen) versteht man alle die knöchernen Gebilde, die ohne vorhergehendes Knorpelstadium sich im Corium bilden. Sie treten besonders am Schädel vielfach in engste Beziehung zum Knorpelskelett, indem sie hier in die Tiefe sinken und sich mit diesem verbinden. Hautknochen im engeren Sinne sind alle Knochengebilde, die dauernd im Bezirk des Coriums, ihrer Bildungsstätte, verbleiben. Hierher sind zu rechnen die Zähne aller Wirbeltiere mit Ausnahme der Hornzähne der Cyclostomen, alle Fischschuppen, ein Teil der Knochenplatten des Schildkrötenpanzers, die Knochenplatten der Krokodile und anderer Reptilien und der Gürteltiere. Alle letztgenannten Verknöcherungen bilden bei den Wirbeltieren zusammen mit den epidermoidalen Hornplatten oder Hornschuppen das Hautskelett (Exoskelett der Wirbeltiere), welches also hier in seiner Gesamtheit aus zwei Komponenten zusammengesetzt ist resp. sein kann, einem knöchernen mesodermalen Teil und einem ektodermalen hornigen Teil.

B. Stützsubstanzen.

Stützsubstanzen im engeren Sinne sind unseres Erachtens auch alle die Hartgebilde die wir oben als „reine Stützsubstanzen" bezeichnet haben. Einmal sind sie mesenchymatischen Ursprungs, ferner dienen sie in allererster Linie zur Aussteifung des Körpers, und in zweiter Linie dem Schutz. Endlich trifft für sie die Bezeichnung Stützsubstanz zu, da sie wohl Zellprodukte darstellen, aber im fertigen Zustand gänzlich zellfrei sind, also streng genommen als Gewebe nicht anzusprechen sind. Ihrer Form nach herrscht eine außerordentliche Mannigfaltigkeit. Ihrer chemischen Beschaffenheit nach bestehen sie nur aus organischer Substanz (z. B. die Hornfäden der Schwämme) oder aus organischer und anorganischer Substanz (z. B. die Spiculae der Kieselschwämme) oder nur aus anorganischer Substanz (organische Beimengungen nur ganz minimal, z. B. Spiculae der Kalkschwämme). Als wichtigste Stützsubstanzen in diesem Sinne seien genannt:

1. Spongin (Spongiolin). Eine braungelbe faserige Substanz von hornähnlicher, elastischer Beschaffenheit. Es wird von besonders modifizierten Zellen der Spongoblasten ausgeschieden. Die Fasern sind geschichtet und bilden maschige, verzweigte Netze, sogenannte Hornfasern (z. B. Badeschwamm). In reinster Form findet man das Spongin bei den Hornschwämmen, aber auch bei anderen Schwämmen (Kieselschwämmen) sind die Nadeln durch Spongin verklebt. Chemisch ist das Spongin ein Albuminoid (Fig. 9).

2. Elastoidinfäden oder Hornfäden. So nennt man die elastischen, homogenen Fäden, die man in den Fischflossen findet, besonders bei Selachiern. Sie sind bräunlich gefärbt, stark lichtbrechend und bestehen aus Elastoidin, einer albuminoiden Grundsubstanz, die nichts mit dem echten Horn der Wirbeltiere zu tun hat. Bisweilen bezeichnet man sie auch als „hornige Flossenstrahlen". Gebildet werden sie von besonders modifizierten Mesodermzellen.

3. Spicula, Nadeln. Man versteht darunter vornehmlich mikroskopisch kleine oder größere Kiesel- oder Kalkkörper, mit oder ohne organischer Beimengung, welche einfache Stäbe darstellen oder mehrstrahlig sind oder auch bestimmte Figuren (Rädchen, Anker usw.) bilden. Sie entstehen im Innern von Zellen (Skleroblasten) und können sich zu Skelettmassen unregelmäßig oder in

ganz typischer Anordnung (z. B. bei Radiolarien) vereinigen, so daß von einem Spicularskelett spricht. Ihrer chemischen Beschaffenheit nach bestehen sie aus: a) Strontiumsulfat (z. B. bei der Radiolariengruppe der Acantharien), b) Kieselsäure, amorph und wasserhaltig (Radiolarien und Heliozoen, Spongien) mit geringen organischen Beimengungen, c) Kalkspat (kristallinisch) eventuell unter Beimengung von phosphorsaurem Kalk und phosphorsaurer Magnesia, sowie kohlensaurer Magnesia und organischer Substanz (bei Spongien, Anthozoen, Echinodermen, Mollusken, Brachiopoden u. a. Gruppen, wie die Kalkspicula überhaupt eine große Verbreitung besitzen Fig. 8 und 9). halten. Wie diese Stützgebilde in den einzelnen Fällen zustande kommen, ist oft sehr schwer zu entscheiden. Einmal kann es sich um die Umwandlung der distalen Epidermiszellen überhaupt handeln, die hierbei völlig absterben (z. B. Hornbildungen der Wirbeltiere). Ferner handelt es sich um Sekretionsprozesse der Epidermiszellen oder nur die distalen Zellenden wandeln sich in die Stützsubstanz um (z. B. bei cuticularen Bildungen der Wirbellosen). Alle diese Gebilde dienen in erster Linie zum Schutz des Körpers und bilden besonders da, wo sie sehr fest sind (z. B. Arthropoden), das Stützgerüst. Die gebildete Grundsubstanz ist ursprünglich weich, erhärtet aber bald besonders durch Einlagerung von kohlensaurem und phosphorsaurem Kalk oder es werden Fremdkörper zu einem festen Gefüge verklebt.

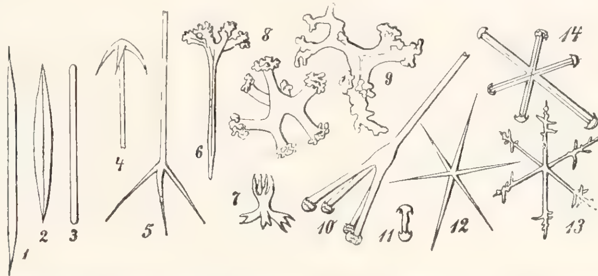


Fig. 8. Kieselnadeln (Spicula) von Silicispongien. Nach Vosmaer. 1 bis 3 Monactinelliden, 4 bis 5 Tetractinelliden, 6 bis 10 Lithistiden, 11 bis 14 Hexactinelliden. Nach H. E. Ziegler.

Der geometrischen Form nach hat man Ein-, Drei- und Vierstrahler (Monactinelliden, Hexactinelliden, Tetractinelliden) sowie wurzelähnlich verzweigte Spicula (sogenannte Lithistiden). Bei Echinodermen treten in großer Reichhaltigkeit die verschiedensten Figuren auf. Das Echinodermenskelett ist wohl sicher aus ursprünglichem Spicularskelett, wie es die Holothurien noch zeigen, hervorgegangen. Die Kalkplatten und Stacheln (auch Spicula genannt) zeigen einen wabigen maschigen Bau, in den Maschen liegen die Bildungszellen. Als Spicula bezeichnet man unter anderem auch die kalkigen Mantelstacheln der Chitonen.

III. Epidermale und cuticulare Stützgebilde und Stützsubstanzen.

Sie leiten sich vom Ektoderm her und sind als Abscheidungs- oder Umwandlungsprodukte der Epidermiszellen anzusehen. Die Bezeichnung „cutucilare Stützgewebe" ist nicht präzis, da man unter „Gewebe" im allgemeinen Zellverbände bezeichnet und diese Gebilde im fertigen Zustand zellfrei sind, obwohl sie organische Substanzen ent-

Alle diese Stützgebilde formen diejenigen Skelette, die man mit dem Sammelnamen Außen- oder Exoskelette bezeichnet. Ihre Morphologie sowohl wie die Struktur ist sehr verschieden und bisweilen hoch kompliziert. Als wichtigste Stützgebilde und Stützsubstanzen seien genannt:

1. **Chitin.** Bei niederen Tieren (Wirbellosen) und besonders bei den Arthropoden als Stützsubstanz weit verbreitet. Als dünne biegsame Haut angelegt (sogenannte chitinige Cuticula), verdickt es sich zu sehr hartem Panzer. Die chemische Konstitution ist noch nicht ganz sicher, es ist eine stickstoffhaltige Verbindung, die man für ein Acetylderivat des Glukosamins hält. Ausgezeichnet ist Chitin durch seine große Widerstandsfähigkeit gegen Lösungsmittel. Konzentrierte Schwefelsäure oder kochende Salzsäure löst es auf. Beim Kochen mit Salzsäure entsteht Glukosamin und Essigsäure. Die histologische Struktur ist oft sehr kompliziert, meist zeigt sich eine der Oberfläche parallele Schichtung

und ein fibrillärer Bau, andererseits ist die Chitinhaut vielfach gänzlich homogen. Gebildet wird das Chitin von den Epidermiszellen (Hypodermis, Matrix), die man auch als chitinogenes Epithel anspricht. Feine Porenkanäle durchsetzen das Chitin. Als Anhänge an den Chitinpanzer finden wir die Stacheln, Haare, Borsten, Schuppen bei den Gliedertieren, ebenfalls chitinig. — Chitinige Bildungen finden sich bei den Hydrozoen (besonders bei den koloniebildenden), wo sie als Peridermhüllen die Stöcke stützen. Dann treffen wir es als Cuticula und Borsten bei Ringelwürmern, bei Mollusken als Kiefer, Radula und in der Cephalopodenschale. Die den ektodermaen Vorder- resp. Enddarm überziehende Cuticula (sogenannte Intima) ist gleichfalls chitinig, ebenso wie die spiralige Auskleidung der Tracheen. — Vielfach findet man die Angabe, die Cuticula der Nematoden, Platoden und einiger anderer Gruppen sei gleichfalls Chitin. Nach neueren Untersuchungen scheint dies nicht der Fall zu sein, sondern es liegt wohl in diesen Gruppen eine albuminoide Substanz vor.

2. Verkalktes Chitin. Eine besondere Festigkeit erlangt das Außenskelett in den Gruppen, wo der Chitinpanzer verkalkt ist, und zwar handelt es sich um Einlagerung von kohlensaurem und phosphorsaurem Kalk in das Chitin, beide bilden eine komplizierte chemische Verbindung. Verkalktes Chitin zeigt ganz ähnliche Strukturverhältnisse (Poren, Schichtung) wie das unverkalkte. Wir finden es besonders bei Krebsen, Bryozoen, Brachiopoden, Myriapoden zum Teil. Es bildet in diesen Gruppen die als Panzer, Stöcke, Schalen bezeichneten Außenskelette. In einigen Fällen überwiegt der Kalk bedeutend z. B. bei den Cirripedien, hier kommt es zur Entwickelung steinharter Schalenstücke.

3. Zellulose. Im Tierreich tritt sie nur bei zwei Gruppen als Stützsubstanz auf, bei der Protozoenklasse der Dinoflagellata und den Tunicaten. Bei ersteren bildet sich ein Hüllskelett aus rhombischen Platten, bei letzteren ist die zellulosehaltige Grundsubstanz (Tunicin) in Form eines bald weicheren, bald knorpelharten Mantels (Tunica) ein Produkt der Epidermiszellen. Es dringen auch Zellen im weiteren Wachstumsverlauf wieder in den Mantel ein. Auch können Fremdkörper und Kalkspicula im Mantel eingelagert sein und dessen Festigkeit erhöhen.

4. Schalen (Testa). Diese morphologisch in außerordentlicher Verschiedenheit vorkommenden Stützgebilde formen das Exoskelett der meisten Mollusken. Bei den Muscheln ist eine bilateralsymmetrische Doppelschale vorhanden. Während die überwiegend größere Zahl der Schnecken ein spiralig gewundenes Gehäuse aufweist, dessen Mündung durch ein besonderes Schalenstück, den Deckel (Operculum), bisweilen noch extra verschlossen werden kann, haben die primitiven Amphineuren noch 8 einzelne Schalenstücke. — Die Schalen (Schulpe) der dibranchiaten Cephalopoden ist ein Chitinkalkgebilde, ebenso wie die mancher Brachiopoden (z. B. Lingula, Chitin und phosphorsaurer Kalk mit etwas kohlensaurem Kalk). — Die Schalen bestehen aus organischer Grundsubstanz (Albuminoid), die man als Conchin oder Conchiolin bezeichnet und aus kohlensaurem Kalk in der Hauptsache, sowie Beimengungen von kohlensaurer Magnesia und phosphorsaurem Kalk und phosphorsaurer Magnesia. Gebildet werden die Schalen, deren feinere Struktur erst von wenigen Formen bekannt und die außerordentlich kompliziert ist, „aus Sekreten, welche von Epithelzellen des Mantels geliefert werden und es entspricht im allgemeinen jeder im Bau und ihrer sonstigen Beschaffenheit verschiedenen Schicht der Schalen auch ein besonderer Epithelbezirk des Mantels bezw. ein irgendwie verschiedenes Sekret" (Biedermann 1912). Vielfach erörtert wurde die Frage, ob der Kalk als Kalkspat oder Aragonit vorhanden sei, und es zeigte sich, daß bei manchen Formen (z. B. Pinna) die Prismenschicht aus Kalkspat, die Perlmutterschicht aus Aragonit besteht, doch hat dieser Befund nicht allgemeine Gültigkeit (Fig. 10 und 11).

Was die Struktur der Schalen anbelangt, so ist sie in der Einzelheit sehr verschieden. Bei den Muscheln finden wir drei Schichten, nach außen das häutige aus Conchin allein bestehende Periostracum (Schalenhaut), welches im späteren Leben vielfach verloren geht. Nach innen folgt dann die Prismenschicht (Porzellanschicht) aus parallelen senkrecht zur Oberfläche gestellten Prismen, die in die organische Grundsubstanz eingebettet sind. Zu innerst liegt die Perlmutterschicht, die fehlen kann. Sie besteht aus sehr dünnen Kalkplättchen, die parallel zur Oberfläche geschichtet sind und den bekannten Perlmutterglanz geben. Die Gasteropodenschale zeigt meist eine mächtige sogenannte Porzellanschicht, die sehr hart ist, und einen blätterigen, lamellären Bau zeigt, soweit eingehende Untersuchungen vorliegen. „Die Schale besteht in ihrer ganzen Dicke aus mehreren übereinander liegenden Systemen dünner Kalkplättchen, welche wie die Blätter eines Buches parallel nebeneinander liegen und in allen Schichten auf der schmalen Kante stehen, so daß ihre Ebene immer senkrecht zur Ebene der Schale gerichtet ist. Die Ebenen der Plättchen bilden in benachbarten Schichten stets miteinander einen rechten Winkel. Niemals

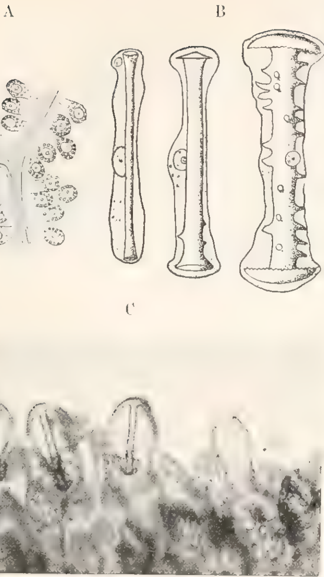


Fig. 9. A Hornfasern eines Badeschwammes mit Spongoblasten. Nach R. Hertwig. B Entwickelung der Amphidisken in Zellen. Nach Evans. C Spicularskelett (Anker und Platten) einer Holothurie Leptosynapta. Mikrophotographie d. Haut. Nach Becher.

fällt die Ebene der Plättchen mit der Schalenfläche zusammen. Jedes einzelne Plättchen besteht wieder aus einer außerordentlich großen Zahl feinster Kalkfasern, deren Richtungen sich in je zwei unmittelbar benachbarten Elementen rechtwinklig kreuzen" (Biedermann 1912). Die Periostracumschicht kann bei Schnecken vielfach fehlen oder ist sehr dünn (Fig. 10).

Die Eischalen der Reptilien und Vögel zeigen einen der Molluskenschale nicht unähnlichen Bau. Es sind Produkte der Uterusdrüsen. Der Kalk ist in prismenähnlichen Säulen angeordnet, außerdem finden sich Luftporen in der Schale.

In Mollusken wie Sauropsidenschalen findet man die verschiedensten Pigmente eingelagert.

5. Horn, Keratin. Echte Hornbildungen als Schutzgebilde und Schutzsubstanz finden wir bei den Wirbeltieren und besonders bei den Sauropsiden nimmt es einen großen Anteil an der Bildung des Exoskeletts. Es handelt sich bei der Hornbildung um eine völlige Umwandlung der distalen Epidermiszellen zur Hornschicht (Stratum corneum) selbst. Das Keratin enthält C, H, N, O, S und ist gewissermaßen die Grundsubstanz des gänzlich zellfreien Horns. In geringem Maße zeigen alle Wirbeltiere Hornbildungen. Die obersten Hornlagen werden dauernd abgestoßen und durch neue ersetzt. Erfolgt die Abstoßung der Hornschichten periodisch, so spricht man von Häutungen (Eidechsen, Schlangen). Verhornungen geringen Grades

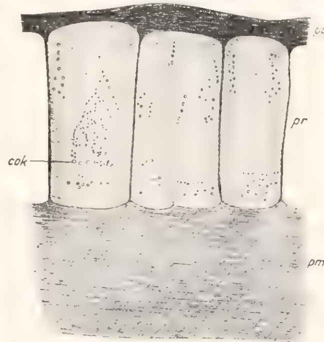


Fig. 10. Querschliff der Schale einer Muschel (Anodonta cellensis). pe Periostracum, pr Prismenschicht, pm Perlmutterschicht, cok Conchiolinkügelchen an den Prismenscheidewänden. Nach Raßbach.

finden wir in der Mundhöhle als Hornzähne bei den Cylcostomen und als „Perlausschlag" bei männlichen Cypriniden. Große Hornschuppen und Hornplatten treffen wir bei den Reptilien, besonders Schildkröten (Schildpatt) und Krokodile, wo die ektodermalen Schutzgebilde in Beziehungen zu den mesodermalen Hautknochen treten und speziell hier bezeichnet man beide zusammen als Haut- oder Exoskelett, was streng genommen nicht genau zutrifft. — Hornig sind ferner Hufe, Klauen, Nägel, Hörner (nicht Geweihe), Krallen, Fischbein, Stacheln, Federn, Haare.

Bei den Vögeln zeigen Lauf und Zehen ausgedehnte Verhornungen in Form kleiner Schilder. Von den Säugern sind die Gürtel- und Schuppentiere mit mächtigen sehr harten Hornplatten als Schutzgebilde bedeckt (Fig. 12).

Die sogenannten Hornskelette der Gorgoniden bestehen nicht aus echtem Keratin, sondern aus einer besonderen albuminoiden Grundsubstanz (Cornein), die in die Kalkspicula eingelagert sind, sie sind aber auch Ektodermgebilde. Ueberhaupt bezeichnet man vielfach der Konsistenz nach Hartgebilde bei Wirbellosen als

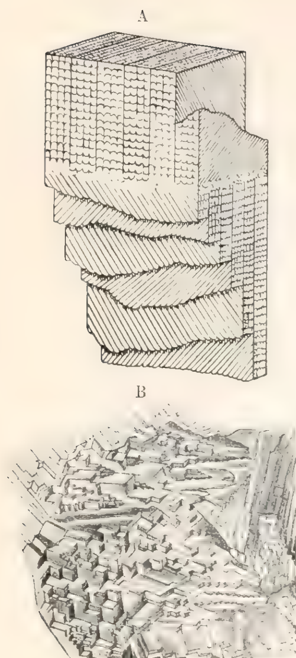


Fig. 11.

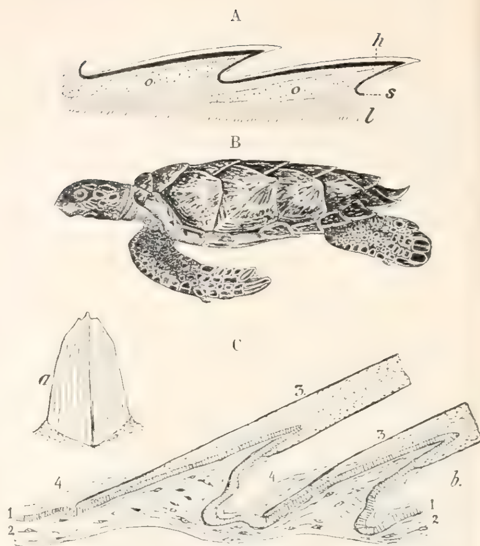


Fig. 12.

Fig. 11. A Schematische Darstellung der Faserlagen der Gasteropoden (Schnecken)-Schale in den von ihnen gebildeten Platten. Nach Nathusius. B Struktur der Schale von Limax agrestis stark vergrößert. Nach Bindermann.

Fig. 12. A Horn- und Knochenschuppen (Hautskelett) von Reptilien. h Horn (Stratum corneum), s Keimschicht (Stratum germinativum) der Epidermis, o Knochenschuppen im Corium l. Nach Boas. B Chelone impricata mit großen „Schildpattplatten". Nach R. Hertwig. C Manis tricuspis, Schuppentier, Hautpanzer im Querschnitt, a eine Schuppe von der Fläche, b Haut mit 2 Stümpfen von Schuppen im Längsschnitt, 1 Epidermis, 2 Corium, 3 Hornschuppen, 4 verhorntes Epithel an der Basis. Nach Weber.

„hornig", ohne über Herkunft und Beschaffenheit damit etwas Bestimmtes auszusagen.

6. Kalk. Kohlensaurer Kalk als Stützsubstanz vom Ektoderm abgesondert findet sich in außerordentlicher Mächtigkeit bei den Steinkorallen (Madreporarien) und bei vielen Rhizopoden, Protozoen (z. B. den Foraminiferen). Hier (Korallen) liegt wohl ein ähnlicher Prozeß vor wie bei der Bildung der Molluskenschale, nur mit dem Unterschied, daß die Beimengung organischer Substanz äußerst gering ist und der Kalk als Aragonit vorliegt. Nach Ansicht der einen Autoren wird das Hüllskelett der Steinkorallen durch Ausscheidungen gebildet, nach anderen intrazellulär in den Chalikoblasten (v. Heider). Die Struktur des Skelettes (sehr verschieden gebaute Stöcke bildend) ist lamellös mit kristallinischem Gefüge.

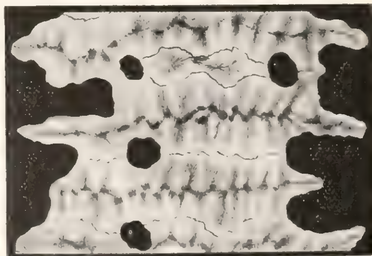


Fig. 13. Querschnitt durch das Kalkskelett von Lophoseris sp. mit strahlig kristallinischem Gefüge. Nach Ogilvie.

Endlich treten auch bei manchen Anneliden (Serpuliden) Kalkröhren als Hüllskelett auf, die von Bauchdrüsen (?) ausgeschieden werden sollen.

Literatur. ***Sobotta,*** *Atlas und Lehrbuch der Histologie und mikroskopischen Anatomie des Menschen. München 1911.* — ***Oppenheimer,*** *Handbuch der Biochemie des Menschen und der Tiere. Jena 1908.* — ***v. Fürth,*** *Vergleichende chemische Physiologie der niederen Tiere. Jena 1903.* — ***Biedermann,*** *Physiologie der Stütz- und Skelettsubstanzen, in Wintersteins Handbuch der vergleichenden Physiologie, Bd.* **III**. *Jena 1912.* — ***Stöhr,*** *Lehrbuch der Histologie, 15. Aufl. Jena 1909.* — ***Wiedersheim,*** *Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere, 7. Aufl. Jena 1809.* — ***C. K. Schneider,*** *Lehrbuch der vergleichenden Histologie der Tiere. Jena 1902.* — ***Derselbe,*** *Histolog. Prakt. der Tiere. Jena 1908.* — *In den angeführten Werken finden sich die umfangreichen Literaturzitate. Vergleiche auch den Artikel „Skelett".*

Albrecht Hase.

Stylolithen.

Eigentümlich nahtartige Zeichnungen und Spältchen, die besonders in Kalksteinen auftreten und zum Teil als Druckerscheinungen (Drucksuturen), zum Teil als Lösungserscheinungen angesehen werden. Aus dem Gestein losgelöst sind es gewöhnlich längsgestreifte Zapfen, die oben nicht selten von einer Muschel oder einem anderen Fossil gekrönt, unten gerundet sind.

Substitution.

1. Definition des Begriffes. 2. Substitutionsreaktionen und ihre Gesetze: a) Allgemeine Bemerkungen über Charakter und Verlauf der Substitution. b) Gesetzmäßigkeiten bei der Einführung des ersten Substituenten in Kohlenwasserstoffe α) von aliphatischem Typus; β) von aromatischem Typus; γ) von gemischt aliphatisch-aromatischem Typus. c) Verhalten der Monosubstitutionsprodukte bei weiterer Substitution α) in der aliphatischen Reihe; β) in der aromatischen Reihe; γ) in der Gruppe der Verbindungen von gemischtem Typus. 3. Mechanismus der Substitutionsvorgänge. 4. Folgen der Substitution und ihre Bedeutung für Wissenschaft und Technik.

1. Definition des Substitutionsbegriffes. Der von Dumas 1834 in die chemische Terminologie eingeführte Begriff der Substitution umfaßt in seiner allgemeinsten Bedeutung den Ersatz der in einer chemischen Verbindung erhaltenen Elementaratome durch andere im Verhältnis ihrer Wertigkeiten. Nach dem augenblicklichen wissenschaftlichen Sprachgebrauch versteht man darunter in erster Linie den Ersatz von H in organischen Verbindungen — und zwar von an C gebundenem H — durch andere Atome oder Radikale, die als Substituenten bezeichnet werden. Man wählt also bei der systematischen Gruppierung der organischen Verbindungen die Kohlenwasserstoffe als Ausgangspunkte, als „Muttersubstanzen" oder „Stammkörper", und leitet von ihnen durch Substitution die übrigen Kohlenstoffverbindungen (die „Derivate") ab, ebenso wie man durch Resubstitution (Rückwärtssubstitution), Austausch der vorhandenen Substituenten gegen H, alle organischen Verbindungen auf die Kohlenwasserstoffe zurückführen kann.

2. Substitutionsreaktionen und ihre Gesetze. 2a) Allgemeine Bemerkungen. Die Substitutionsvorgänge sind ihrem allgemeinen Charakter nach wenigstens in der Theorie umkehrbare Reaktionen, (d. h. Reaktionen, die nicht in einem Sinn zu Ende gehen, sondern nur zu einem von den gegebenen Bedingungen abhängigen und mit ihnen wechselnden Gleichgewichtszustand führen) und den für derartige Reaktionen geltenden Gesetzmäßigkeiten unterworfen. Dementsprechend läßt sich bei gleichbleibenden äußeren Bedingungen (Druck, Temperatur, Konzentration der reagierenden Bestandteile) wohl die Geschwindigkeit, mit der das Gleichgewicht erreicht wird, häufig durch geeignete Zusätze („Katalysatoren") stark beeinflussen, — eine Möglichkeit, von der man bei der präparativen Durchführung von Substitutionsreaktionen ausgedehntesten Gebrauch macht, — nicht aber seine Lage. Diese wird vielmehr ausschließlich bedingt durch das Verhältnis der Affinität zwischen C und H auf der einen, C und dem substituierendem Atom oder Radikal auf der anderen Seite. Aus dem vorliegenden umfangreichen Beobachtungsmaterial ergibt sich, daß dieser Quotient nicht, wie man zunächst erwarten könnte, konstant, sondern schwankend, und zwar abhängig ist von der Konstitution des Moleküls, in dem sich die Substitution vollzieht. Im einfachsten Fall, bei den Kohlenwasserstoffen, variiert seine Größe und damit auch der Verlauf der Substitution mit dem Bau des C-Gerüstes; in Verbindungen, in denen bereits Substituenten vorhanden sind, werden beide auch von diesen in gesetzmäßiger Weise beeinflußt.

2b) Gesetzmäßigkeiten bei der Substitution von Kohlenwasserstoffen. Die Abhängigkeit des Substitutionsverlaufes

vom Bau des C-Gerüstes ist bei den Kohlenwasserstoffen, die sich überhaupt der direkten Substitution zugänglich erweisen und nicht zunächst in beständige Additionsprodukte übergehen, — sich also dem substituierenden Agens gegenüber als gesättigte Verbindungen verhalten, — so charakteristisch, daß man sie daraufhin in drei Klassen hat einteilen können, in aliphatische und in alicyklische, in denen die Kohlenstoffatome in offenen oder ringförmig geschlossenen, normalen oder verzweigten Ketten angeordnet sind, in aromatische, denen eigenartige, aus sechs Kohlenstoffatomen gebildete Gruppierungen, sogenannte Benzolkerne, zugrunde liegen, und in solche von gemischtem Typus, die in ihrem Verhalten die Merkmale der beiden anderen Gruppen vereinigen.

α) Die gesättigten Kohlenwasserstoffe von aliphatischem Charakter sind gegen substituierende Agentien außerordentlich widerstandsfähig. Man glaubte lange, daß H in ihnen nur durch Cl oder Br unter Mitwirkung des Lichtes ersetzbar sei: Konowalow hat jedoch gezeigt, daß man auch $-NO_2$ dafür einführen kann, indem man mit verdünnter Salpetersäure auf 130 bis 140° erhitzt. Der feinere Bau des Kohlenstoffgerüstes markiert sich insofern, als unter sonst gleichen Verhältnissen tertiär gebundene H-Atome im allgemeinen leichter als sekundäre, diese leichter als primäre substituiert werden. Die Bindung der Substituenten, namentlich der Halogenatome, ist ziemlich locker. Ihr Austausch gegen andere Substituenten (Gewinnung direkt nicht zugänglicher Substitutionsprodukte durch indirekte Substitution) ist daher ebenso wie die Resubstitution verhältnismäßig leicht zu bewerkstelligen.

β) Ganz anders wie die aliphatischen verhalten sich bei der direkten Substitution die Kohlenwasserstoffe der aromatischen Reihe. An einen Benzolkern gebundene H-Atom lassen sich nicht nur gegen Cl, Br (unter bestimmten Bedingungen sogar gegen J) austauschen, sondern mit größter Leichtigkeit auch gegen $-NO_2$ („Nitrierung"), $-SO_3H$ („Sulfierung"), Alkyle und Acyle (Reaktionen nach Friedel-Crafts), und zwar erweisen sich bei allen diesen Reaktionen die sechs Benzol-H-Atome vollkommen gleichwertig. Die einmal eingetretene Substituenten haften außerordentlich fest am Benzolkern, und es bedarf zu ihrer Auswechslung gegen andere, auch gegen H (Resubstitution), sehr energischer Einwirkung oder besonderer Verfahren. Unter diesen sind an erster Stelle die sogenannten Diazoreaktionen zu erwähnen, Reaktionen, die über die Amidogruppe und die aus dieser durch salpetrige Säure entstehenden Diazoverbindungen hinweg einen Austausch von $-NO_2$ gegen zahlreiche andere Elemente und Radikale ermöglichen. In den sonst sehr reaktionsträgen Halogenbenzolen erweist sich das Halogen beim Zusammentreffen mit gewissen Metallen (Na bei der von Fittig aufgefundenen Synthese homologer Benzole, Mg und Cu bei den Synthesen nach Grignard und Ullmann) als überraschend reaktionsfähig. $-SO_3H$ wird beim Verschmelzen der aromatischen Sulfosäuren mit Alkalihydroxyd, -amid oder -cyanid durch $-OH$, $-NH_2$ und $-CN$ ersetzt.

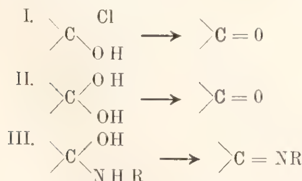
γ) Besonders auffallend offenbaren sich endlich die Unterschiede in der Ersetzlichkeit aliphatisch und aromatisch gebundener H-Atome, wenn beide nebeneinander in demselben Molekül vorhanden sind: bei den Kohlenwasserstoffen von gemischt aliphatisch-aromatischem Typus, den Homologen des Benzols. In derartigen Kohlenwasserstoffen, z. B. im Toluol, $C_6H_5.CH_3$, ist der H der Methylgruppe wie in den rein aliphatischen Verbindungen direkt nur durch $-NO_2$ beim Nitrieren nach Konowalow durch Cl oder Br ersetzbar, und letzteres auch nur dann, wenn man im Licht und bei erhöhter Temperatur halogeniert. Unter anderen Umständen dagegen reagieren zuerst und vor allem die H-Atome am Benzolkern, ebenso lassen die übrigen Substitutionsreaktionen, die bei aliphatischen Kohlenwasserstoffen versagen, Nitrierung durch Salpeter-Schwefelsäuregemisch, Sulfierung, Alkylierung und Acylierung nach Friedel und Crafts, die Seitenkette unberührt und greifen nur im Kern an.

2c) Verhalten der Monosubstitutionsprodukte bei weiterer Substitution. Ebenso abweichend voneinander wie bei der Einführung des ersten reagieren die verschiedenen Kohlenwasserstofftypen auch beim Eintritt weiterer Substituenten. Bei allen dreien erfolgt er jedoch wiederum streng gesetzmäßig, so daß von der, mit der Zahl der C-Atome im Molekül rapide anwachsenden Zahl von möglichen Isomeren immer nur eins oder einige wenige wirklich erhalten werden.

α) In der aliphatischen Reihe erfolgt die weitere Substitution, da die H-Atome an den H-ärmsten C-Atomen am leichtesten substituiert werden („tertiäre leichter als sekundäre, sekundäre leichter als primäre", siehe oben) in der Regel an dem bereits substituierten C, falls an diesem noch H vorhanden ist: Chloräthyl, $CH_3.CH_2Cl$, liefert bei erneuter Chlorierung nicht Aethylenchlorid, $CH_2Cl.CH_2Cl$, onderns Aethylidenchlorid, $CH_3.CHCl_2$. Dieser aktivierende Einfluß vorhandener Substi-

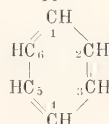
tuenten auf die am gleichen C haftenden H's ermöglicht bei den monosubstituierten Kohlenwasserstoffen Substitutionsreaktionen, die bei den Kohlenwasserstoffen selbst nicht ohne weiteres gelingen; so kann z. B. in den primären und sekundären Alkoholen H an dem hydroxylierten C leicht durch — OH ersetzt werden. Er äußert sich besonders kräftig, wenn er nicht von einem einzelnen Elementaratom ausgeübt wird, sondern von mehreren, die zu einer ungesättigten Gruppe [$>C = O$, $>C = C<$, $>C = N—$, $—N\langle{}^{O}_{(O)}$ usw.] vereinigt sind. Näheres darüber findet sich in den Veröffentlichungen von Henrich, Thiele, Vorländer, Borsche (Liebigs Annalen der Chemie Bd. 306 1899, 320 1902, 375 1910), ferner in den Artikeln dieses Handwörterbuchs „Gruppen“ und „Ungesättigte Verbindungen“.

Wenn aber auch der Eintritt weiterer Substituenten in aliphatische Verbindungen durch die primäre Substitution wesentlich befördert wird, so gelingt es doch häufig nicht, die erwarteten Polysubstitutionsprodukte in unveränderter Form zu isolieren; denn die Anhäufung mehrerer Substituenten an einem C und ihre damit zusammenhängende räumliche Annäherung begünstigt in hohem Maße sekundäre Reaktionen zwischen ihnen: mehrere Substituenten an demselben C vertragen sich nicht immer, wie man es kurz auszudrücken pflegt. Als besonders unverträglich erweist sich — OH, das den Platz am C im allgemeinen weder mit Halogen (I.), noch mit einem zweiten — OH oder — SH (II.), noch mit einer Amidogruppe (III.) teilt. Es wird in solchen Fällen vielmehr spontan Halogenwasserstoff oder Wasser abgespalten



und ein Disubstitutionsprodukt gebildet, in dem zwei H durch ein zweiwertiges Atom oder Radikal =O, =S oder =NR ersetzt sind.

β) In der aromatischen Reihe haben die Untersuchungen über die Vorgänge bei mehrfacher Substitution zu dem grundlegenden Resultat geführt, daß die fünf in den monosubstituierten Benzolen noch vorhandenen H-Atome sich nach ihrem Verhalten bei Einführung eines weiteren Substituenten in drei Kategorien scheiden lassen, zwei Paare einander gleichwertiger und ein drittes für sich stehendes. Es gehören also zu jedem monosubstituierten Benzol drei und nur drei bisubstituierte, die man als Ortho- (o-), Meta-(m-) und Para-(p-) biderivate unterscheidet. Ihren graphischen Ausdruck hat diese Beobachtung, zusammen mit der früher erwähnten Gleichwertigkeit der sechs H's im nicht substituierten Benzol, in der Benzolformel von Kekulé, einem Ring von sechs abwechselnd durch einfache und „doppelte“ Bindungen miteinander verknüpften $>CH$-Gruppen



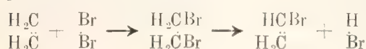
gefunden, die namentlich im Lichte der Thieleschen Theorie der ungesättigten Verbindungen (Liebigs Annalen der Chemie, Bd. 306, S. 125ff. [1899]) dem Gesamtverhalten des Benzols und seiner Derivate in weitgehendster Weise Rechnung trägt. Es hat sich nachweisen lassen, daß in den o-Biderivaten, die sich von einem am C^1 monosubstituierten Benzol ableiten, der zweite Substituent an C^2 bzw. C^6 haftet, in den m-Verbindungen an C^3 [= C^5], in der p-Reihe an C^4. Ferner hat sich gezeigt, daß der erste Substituent den zweiten gewöhnlich entweder zum Teil in die o-, zum Teil in die p-Stellung dirigiert, oder ausschließlich nach m-, und daß in Uebereinstimmung damit den o- und p-Biderivaten manche Eigentümlichkeiten gemeinsam sind, die den m-Verbindungen fehlen. Näheres über die verschiedenen Formen, in denen man diese Gesetzmäßigkeiten auszusprechen, und über die Hypothesen, durch die man sie zu erklären versucht hat, findet sich bei Holleman, „Die direkte Einführung von Substituenten in den Benzolkern“ [erschienen bei Veit u. Co., Leipzig 1910). Ebendort ist auch das bisher vorliegende experimentelle Material über den Reaktionsverlauf bei der weiteren Substitution der bisubstituierten Benzole gesammelt und gesichtet.

γ) Was endlich die weitere Substitution der monosubstituierten Kohlenwasserstoffe von gemischt aliphatisch-aromatischem Typus anbelangt, so scheint nach den bisherigen Erfahrungen die Anwesenheit eines Substituenten im

aliphatischen Teil des Moleküls nur diesen, nicht aber die Reaktionsfähigkeit der Benzol-H-Atome gegenüber substituierenden Agentien zu beeinflussen. Dagegen können Substituenten im Benzolkern den Ersatz von H-Atomen, die an dem unmittelbar am Kern stehenden C der Seitenkette haften, manchmal (nämlich, wenn es sich um ungesättigte Gruppen in o- oder p-Stellung zu dieser Seitenkette handelt) außerordentlich erleichtern, unter bestimmten Umständen aber auch durch ihre Raumerfüllung erheblich erschweren oder ganz verhindern

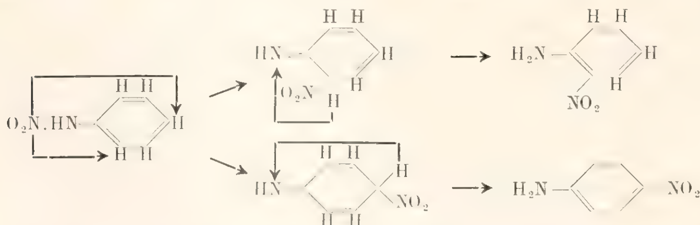
Auf die komplizierten und erst zum Teil bekannten Gesetze, die die Substitutionsvorgänge bei den Verbindungen mit kondensierten Kernen (Naphthalin, Anthracen usw.) und bei den sogenannten heterocyklischen Verbindungen regeln, wird an anderen Stellen dieses Werkes, bei der Besprechung der Körperklassen, für die sie gelten, ausführlicher eingegangen werden.

3. Mechanismus der Substitution. Ueber den Mechanismus der bei der Substitution sich abspielenden Vorgänge sind unsere Kenntnisse einstweilen noch recht lückenhaft. Die Anschauungen darüber, die dem augenblicklichen Stand der experimentellen Forschung am besten entsprechen, gehen aus von gewissen Beobachtungen, die bei der Darstellung von Substitutionsprodukten ungesättigter Verbindungen gesammelt worden sind, nämlich von deren Fähigkeit, sich mit dem substituierenden Agens zunächst zu einem beständigen Additionsprodukt zu vereinigen, das bei geeigneter Weiterbehandlung nicht wieder das Ausgangsmaterial, sondern ein Substitutionsprodukt desselben liefert:



Man ist, einer zuerst von Kekulé geäußerten Ansicht folgend, geneigt, einen analogen Verlauf der Substitution auch bei den gesättigten Verbindungen anzunehmen, obgleich bei ihnen der Nachweis von Additionsprodukten als Vorstufen der Substitution bisher noch nicht sicher gelungen ist. Erscheinungen anderer Art, die wohl mit dieser, nicht aber mit der von Nef herrührenden Theorie der Substitutionsvorgänge (Liebigs Annalen der Chemie, Bd. 298, S. 202ff. [1896]) harmonieren, sind vor kurzem von E. Fischer beim Studium der „Waldenschen Umkehrung" und ganz unabhängig davon auf anorganisch-chemischem Gebiet von A. Werner aufgefunden worden (siehe darüber Liebigs Annalen der Chemie, Bd. 381, S. 123ff., Bd. 383, S. 123ff. [1911], vgl. auch den Artikel „Ungesättigte Verbindungen").

Von dieser gewöhnlichen Art der Substitution, bei welcher der Substituent sogleich an seinen definitiven Platz im Molekül gelangt, unterscheidet sich ihrem Mechanismus nach scharf eine zweite Gruppe von Substitutionsvorgängen, die sich besonders gut bei den im Benzolkern amidierten aromatischen Verbindungen haben verfolgen lassen, sich aber in ähnlicher Weise auch bei den Phenolen und anderen Körpern zu vollziehen scheinen. Der Substituent ersetzt dabei zunächst H am N und gelangt erst durch Umlagerung dieser häufig isolierbaren primären Produkte an ein Kern-C, während das an diesem haftende H den freigewordenen Platz am N einnimmt. Da bei den Substitutionen, die nach diesem Schema verlaufen, immer nur o- und p-substituierte Produkte entstehen, hängen sie offenbar eng mit den Erscheinungen der Chinontautomerie zusammen und führen vermutlich über labile chinoide Zwischenstufen:



Analoge Reaktionsfolgen, Bildung eines am Heteroatom substituierten labilen Produktes, das sich leicht in das stabile C-Derivat umlagert, sind auch bei der Substitution von heterozyklischen Verbindungen häufig beobachtet worden.

4. Folgen der Substitution und ihre Bedeutung für Wissenschaft und Technik. Von den physikalischen Eigenschaften werden durch Substitution am C haftender H-Atome der Siedepunkt und der Schmelzpunkt der Stammsubstanz verändert, aber

nur ersterer immer erhöht. Auffallende und leicht nachweisbare Verschiebungen treten ferner gewöhnlich ein im spezifischen Gewicht, in den Löslichkeits- und Kristallisationsverhältnissen und im optischen Verhalten (Absorptions-, Brechungs- und Zerstreuungsvermögen, bei optisch aktiven Substanzen auch im Drehungsvermögen; letzteres namentlich dann, wenn die Substitution an einem asymmetrischen C vorgenommen wurde) ein.

In chemischer Beziehung sind die Unterschiede zwischen Substitutionsprodukt und Muttersubstanz im allgemeinen kleiner, als man erwarten sollte —, wenn nicht etwa das C-Gerüst des Stammkörpers bei der Substitution eine wesentliche Veränderung erfahren hat. Gelockert wird es freilich durch jeden neu herantretenden Substituenten, und bei öfterer Wiederholung des Vorganges wird schließlich immer ein Punkt erreicht, an dem einzelne Kohlenstoffatome davon abgesprengt werden oder das ganze Gebäude in sich zusammenbricht.

Die spezifischen Eigenschaften von Radikalen, die substituierend in den Molekularverband eintreten, bleiben im großen ganzen erhalten, wenn sie auch im einzelnen durch das Zusammentreffen mit anderen Substituenten gleichen oder entgegengesetzten Charakters verstärkt oder abgeschwächt werden können. Dagegen büßen substituierende Einzelatome sie fast vollkommen ein — wie weitgehend, zeigt das Beispiel des Jodoforms, CHJ_3, das auf 96,69 Gewichtsteile J nur 3,05 Teile C und 0,25 Teile H enthält, also fast ausschließlich aus J besteht, und doch keine von den charakteristischen Eigenschaften dieses Elementes mehr besitzt — und beweisen damit, daß der chemische Charakter komplizierterer Moleküle weniger von der Qualität der an ihrem Aufbau beteiligten Atome wie von der besonderen Art ihrer Anordnung bedingt wird.

In den Substitutionsreaktionen ist also dem Chemiker ein Mittel in die Hand gegeben, das ihm erlaubt, die physikalischen und chemischen Eigenschaften organischer Verbindungen willkürlich in bestimmter Richtung zu verändern, und darin beruht ihre hohe wissenschaftliche und technische Bedeutung. Auf der einen Seite kann man sich ihrer bedienen, um in Gemengen organischer Verbindungen die einzelnen Bestandteile in Form ihrer Substitutionsprodukte nebeneinander nachzuweisen und voneinander zu trennen. Andererseits gestatten die mannigfachen Umformungen, die sich mit den Stammkörpern durch planmäßige Einführung von Substituenten und durch deren Austausch gegen andere vornehmen lassen, die einzelnen Verbindungsgruppen in einen durchsichtigen genetischen Zusammenhang zu bringen und aus bekannten Substanzen neue von vorher zu bestimmenden wertvollen Eigenschaften zu gewinnen.

Näheres darüber vgl. in den Artikeln „Konstitution“, „Synthese“, „Gruppen“ und „Radikale“.

Literatur. ***V. v. Richter,*** *Chemie der C-Verbindungen, 11. Aufl., Bonn 1909.* — ***F. Beilstein,*** *Handbuch der organischen Chemie, 3. Aufl., Hamburg und Leipzig 1899.*

W. Borsche.

Sulfokörper.

Siehe den Artikel „Thio- und Sulfoverbindungen“.

Süßstoffe.

1. Definition. 2. Geschmack und Konstitution. 3. Saccharinfabrikation.

1. Definition. Vom wissenschaftlichen Standpunkte sind als Süßstoffe alle süß schmeckenden Körper zusammenzufassen. Diese physiologische Eigenschaft besitzt aber eine große Anzahl anorganischer und organischer Verbindungen, von denen nur ganz wenige, praktisch verwendete, wie die Zucker und das Saccharin, auch im Sprachgebrauche als Süßstoffe bezeichnet werden.

2. Geschmack und Konstitution. Da es von hohem Werte wäre, den Geschmack etwa wichtiger Arzneimittel oder künstlicher Nährstoffe durch geeignete chemische Modifizierung des Moleküls korrigieren zu können, so sind mehrfach Versuche gemacht worden, die Beziehungen zwischen Geschmack und Konstitution aufzudecken. Haben diese Bemühungen auch aus leicht begreiflichen Gründen bisher zu keiner Theorie jener Beziehungen führen können, so erlauben die beobachteten Regelmäßigkeiten immerhin den Schluß, daß der Geschmack (ebenso wie der Geruch) der Stoffe auf chemischer Reizung der lebendigen Substanz der Geschmacksorgane (bezw. Geruchsorgane) beruht. Stoffe, die in die lebendige Substanz nicht einzudringen vermögen, oder sich indifferent gegen sie verhalten, sind also geschmack- und geruchlos. Erst die Anwesenheit reaktionsfähiger, unge-

sättigter „sapiphorer“[1]) Atomgruppen verleiht dem Moleküle Geruch oder Geschmack[2]), wie auch umgekehrt jede Atomgruppe, die mit der lebendigen Substanz der Geschmacksorgane in chemische Wechselwirkung zu treten vermag, nach dem Gesetze der spezifischen Sinnesenergien dem Moleküle, dem sie zugehört, Geschmack verleihen muß.

Da nun die lebendige Substanz der Geschmacksorgane aber aus verschiedenen Molekülarten von unbekanntem, aber sicher höchst kompliziertem Bau besteht, die die mannigfachsten, chemischen Wechselwirkungen, je nach den höchst subtil zu präzisierenden Bedingungen einzugehen vermögen, so ist es klar, daß sich über den Geschmack eines Stoffes im allgemeinen nichts voraussagen läßt. Jede auch noch so feine struktur- oder valenzchemische, ja sterische Verschiedenheit zweier Stoffe wird ja jene, übrigens ihrer Natur nach uns ganz unbekannten Wechselwirkungen und damit den Geschmack modifizieren. Um nur ein Beispiel vorwegzunehmen, werden im allgemeinen, da die lebendige Substanz aktive Stoffe enthält, auch Spiegelbildisomere verschiedenen Geschmack haben. Kurz zusammengefaßt kann man also sagen, daß die Ableitung der Geschmacksqualität aus chemischen Daten an der chemischen Komplexität und enormen chemischen Empfindlichkeit der lebendigen Substanz scheitert, zu deren spezieller Natur gerade Geschmack und Geruch als durchaus subjektive Erfahrungen in engster Beziehung stehen.

Die Intensität des Geschmacks, speziell des süßen, kann aus demselben Grunde nur relativ beurteilt werden. In der Praxis gibt man die Süßigkeit eines Stoffes im Vergleich zu einem bekannten anderen an.

Verfügen wir nach den obigen Ausführungen gegenwärtig und wohl auch für eine weite Zukunft über keine Theorie des Zusammenhanges zwischen Geschmack, speziell süßem und Konstitution, so haben doch die Versuche zu einer solchen zu gelangen zur Kenntnis einer Reihe interessanter und merkwürdiger Analogien geführt, deren wichtigste wir speziell für den süßen Geschmack in kurzen Umrissen andeuten wollen.

Hierher gehört in erster Linie die Tatsache, daß süßer Geschmack fast nie durch Atome oder Atomgruppen starker einseitiger Reaktivität erzeugt wird. Die „sapiphoren“ Komplexe, die süßen Geschmack erzeugen, sind ungemein oft amphoterer oder tautomerer Natur. Schon unter den anorganischen Stoffen sind es meist Salze und Verbindungen amphoterer Elemente, wie Blei, Aluminium, Beryllium, dreiwertiges Bor, Chrom, die süß schmecken, während die stark positiven Alkali und Erdalkalimetalle ebensowenig süß sind wie die Halogene. Süßer Geschmack kommt übrigens unter den anorganischen Stoffen sowohl ionisierten, wie den Salzen, als auch undissoziierten Stoffen wie Stickoxyd zu. Bei süßen Ionen ist in Uebereinstimmung mit obigen Ausführungen der süße Geschmack um so intensiver, je größer ihre Wanderungsgeschwindigkeit ist (Kahlenberg).

Daß dieser Regel jedoch zahlreiche Ausnahmen entgegenstehen, zeigt das Verhalten der seltenen Erdmetalle, wie Gd, Y, La, Yb, Ce, Di, Er, die chemisch bekanntlich den Erdalkalimetallen nahestehen und ihren Salzen süß adstringierenden Geschmack verleihen. Die Behauptung, daß die „Dulcigenität“ eine periodische Funktion der Atomgewichte sei (Haycraft), dürfte sich also schwerlich belegen lassen.

In viel mannigfacherer Form tritt uns die erwähnte Regelmäßigkeit auf organischem Gebiete entgegen. Während die Karbonsäuren sauer, die Ammoniumverbindungen und Amine bitter schmecken, sind die Aminosäuren, die beide Funktionen vereinen, bekanntlich süß. Die alkoholischen Hydroxylgruppen, die sowohl in den Alkoholaten schwach sauer, in den Estern schwach basische Funktionen ausüben, verleihen süßen Geschmack. Die nicht tautomeren Phenole sind durchweg bitter, süß dagegen die tautomeren. Während Brenzcatechin bitter ist, hat Hydrochinon schon einen ganz schwach süßen Geschmack, Resorcin und ebenso Orcin die bekanntlich als Cyclohexendione reagieren können (Herzig und Zeisel) sind stark süß. Analog ist Pyrogallol bitter, Phloroglucin süß.

Ist auch eine Prüfung der Allgemeingültigkeit solcher und ähnlicher Regelmäßigkeiten zurzeit schon deshalb unmöglich, weil leider nur in wenig Fällen der Geschmack neuhergestellter Verbindungen in ihrer Beschreibung einen Platz findet, so darf doch sicher behauptet werden, daß diese Prüfungen zu negativen Resultaten führen werden. Wir kennen in den aliphatischen Nitrokörpern tautomere Körper, die keineswegs süß sind, Nitrophenol, aber auch Nitrobenzol sind dagegen süß — von den drei Nitranilinen ist nur eines, das m-Nitranilin und zwar intensiv süß, und gerade die gewiß konstitutiv eindeutigen Halogenparaffine (nicht aber die aromatischen

[1]) Bezw. „osmophorer“ nach W. Sternberg.

[2]) Dies zeigt sich für den Geruch sehr anschaulich bei den aliphatischen Kohlenwasserstoffen, während Aethan geruchlos ist, riecht Aethylen schon schwach, eigenartig süßlich. Acetylen besitzt einen äußerst intensiven widerlichen Geruch.

Halogenkohlenwasserstoffe) sind sehr süße Körper.

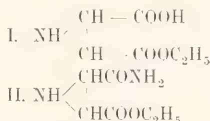
In ähnlicher Weise darf man keineswegs von gewissen sapiphoren Gruppen, selbst wenn keine Störung durch fremde Atomkomplexe vorliegt, immer erwarten, daß sie süßen Geschmack erzeugen. Während bekanntlich bei den aliphatischen Polyalkoholen und Zuckern der süße Geschmack mit der Zahl der Hydroxylgruppen bis zu den Hexiten und Hexosen ansteigt, ist er bei den Octiten, Noniten und etwa der Mannononose wieder verschwunden. Die Aldosen und Hexosen, die ein OH weniger als die entsprechenden Alkoholzucker enthalten, sind doch die süßeren, obgleich die CO oder $C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup O}{\diagdown H}$ Gruppe sonst keinen sonderlich süßen Geschmack zu verleihen scheint. Und selbst bei den nur stereomeren Hexosen herrscht bezüglich des Süßigkeitsgrades höchste Discrepanz, soll doch nach A. v. Ekenstein kristallisierte Mannose sogar bitter sein. Mag nun diese Angabe nach P. Mayer und C. Neuberg wirklich zu korrigieren sein, man sieht doch, wie viele andere Faktoren außer den sapiphoren Gruppen oder Atomanordnungen für den Geschmack schließlich maßgebend sind.

Ganz ähnlich verhält sich übrigens die zweite meist süßen Geschmack verleihende Gruppe, NH_2CR_2—COOH, insofern als die Polypeptide, die sie so viele Male enthalten, durchaus nicht süß sind. Schon Dipeptide wie d-Alanyl-l-Leucin oder Leucyl-Asparagin sind geschmacklos oder schwach bitter, die höheren Glieder sind stark bitter und nähern sich auch darin den natürlichen Peptonen. Und auch hier ist der sterische Einfluß auf den Geschmack ganz enorm, während d- und l-Tryptophan und d- und l-Leucin süß sind, ist sogar die Racemform, die doch aus ihnen besteht, geschmacklos, d-Asparagin süß, l-Asparagin geschmacklos und die Literatur enthält zahlreiche ähnliche Beispiele.

In vielen Fällen ist es daher ganz unmöglich, irgendwelche chemische Gründe für die Geschmacksdifferenzen abzusehen. Hierher gehören insbesondere die Erscheinungen bei der Salzbildung. Das Natriumsalz des süßen Saccharins ist ebenfalls süß, Zuckerkalk aber bitter, süß dagegen wieder Methylglucosid, Methylinosit und so fort, also Körper, in denen das OH doch noch viel stärker als im Zuckerkalk festgelegt ist. Einen anderen Fall bieten das Glycocoll und seine Methylderivate dar. NH_2CH_2COOH ist süß und ebenso CH_3-$NHCH_2COOH$, Dimethylglycocoll $(CH_3)_2$-NCH_2COOH ist nicht süß — Betain aber wieder schwach süß —, gegen alle Regel überdies schon weil die Ammonsalze sonst ebenso wie die Basen heftig bitter sind.

Angesichts solcher Fälle wird es kaum wundernehmen, daß die Einführung ganz indifferenter Gruppen in ein Molekül auf den Geschmack zurückwirkt. W. Sternberg hat zur Erklärung derartiger Fälle angenommen, daß zur Erzeugung süßen Geschmackes eine gewisse Harmonie und Symmetrie[1]) des Molekülbaues nötig sei. Jedem OH sollte hiernach beispielsweise ein Methyl gegenüberstehen, wie das etwa beim Glyzerin CH_2OH CHOH CH_2OH verwirklicht ist, ein überschüssiges Methyl soll unschädlich sein, — Methylinosit ist süß —, das zweite schadet schon sehr, — Aethylglucose ist nur schwach süß, Methylrhamnose bitter. Aus demselben Grunde sollen die Disaccharide noch süß, die Polysaccharide geschmacklos sein, wobei indes sehr merkwürdig ist, daß das Disaccharid Rohrzucker bekanntlich süßer als Dextrose sowohl wie Lävulose ist. Es ist aber nach obigem klar, daß solche noch so geistreiche Theorien kaum eine allgemeine Bestätigung erwarten dürfen.

Nur in wenigen, aber deshalb besonders interessanten Fällen gelingt es die Vernichtung des süßen Geschmackes auf eine einzige schädigende Gruppe dadurch zurückzuführen, daß man denselben durch ihre Paralysierung wiederherzustellen vermag. Während die Carbonsäure I bitter ist, ist ihr Amid II



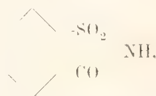
süß. Das Ammonsalz der Glycyrrhizinsäure ist süß, nicht die freie Säure, und das Amid der sauren Asparaginsäure ist das süße Asparagin. Umgekehrt ist zum Beispiel m-Oxybenzoesäure süß, ihr Amid bitter, die COOH-Gruppe ist also ein integrierender Teil der geschmackgebenden Atomanordnung, deren einzelne Gruppen qualitativ auf das Feinste gegeneinander abgestimmt sein müssen.

An einer viel größeren Zahl von Beispielen läßt sich der Einfluß der gegenseitigen Stellung qualitativ gleicher sapiphorer Gruppen studieren. So zeigen schon geometrisch isomere Aethylen- und Kohlenstoffstickstoffverbindungen mitunter verschiedenen Geschmack. Während Benzyl β-

[1]) Sternberg wendet diese Auffassung auch auf die Polyphenole an, mir scheint jedoch nicht ganz glücklich. Denn zweifellos ist z. B. doch Hydrochinon symmetrischer als Resorcin, und trotzdem viel weniger süß.

Aminocrotonester vom Schmelzpunkt 79° geschmacklos ist, ist die bei 210° schmelzende Modifikation süß und von den isomeren Anisaldoximen ist die anti-Form süß, die syn-Form geschmacklos. In noch größerem Maßstabe finden sich derartige Unterschiede natürlich bei wahren Stellungsisomeren, nur α-, nicht aber β- und γ-Aminosäuren sind süß, und die stellungsisomeren Substitutionsprodukte aromatischer Kerne zeigen charakteristische Geschmacksdifferenzen. So sind von den Disubstitutionsprodukten des Benzols die ortho-Verbindungen am häufigsten süß, o-Amido-, o-Oxy- und o-Nitrobenzoesäure sind süß, auch das wichtige Saccharin ist eine ortho-Verbindung. Weniger häufig sind Süßstoffe unter den m-Verbindungen, hierher gehören z. B. m-Oxybenzoesäure und m-Amidobenzonitril; am seltensten sind süße para-Verbindungen, deren bekannteste, das Dulcin $C_2H_5OC_6H_4$-$NHCONH_2$ (para-Phenetolcarbamid), schon eine ziemlich komplizierte Seitenkette besitzt.

Ein interessantes Beispiel, das die Kompliziertheit der Beziehungen zwischen Geschmack und Konstitution deutlich hervortreten läßt, bieten das technisch so wichtige Saccharin und seine Derivate. Das Saccharin, dem die Formel:

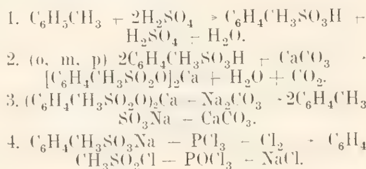


eines ortho-Benzoesäuresulfinids zukommt, ist bekanntlich ein Süßstoff von ganz enorm intensivem Geschmack, es ist das Anhydrid einer völlig geschmacklosen Säure. Saccharinnatrium und N-Methylsaccharin sind noch Süßstoffe, Aethylsaccharin schon geschmacklos. Von den substituierten Saccharinen ist die p-Nitroverbindung bitter, die p-Amidoverbindung süß. p-Fluorsaccharin ist stark süß mit schwach bitterem Nachgeschmack, das p-Chlorderivat ist bitter, das p-Bromderivat wieder stark süß mit stark bitterem Nachgeschmack, para-Jodsaccharin wieder stark bitter.

So interessant diese und andere zahlreiche Analogien der Literatur sind, sie gewähren offenbar dem Praktiker keine Anhaltspunkte für die Synthese von Süßstoffen, oder die Geschmackskorrektur wichtiger Stoffe. Es ist daher kein Zufall, daß den natürlich vorkommenden wertvollen Süßstoffen, den Zuckern, bisher durch synthetische Produkte keinerlei ernstliche Konkurrenz gemacht wurde. Wir besitzen in den Zuckern ja Süßstoffe, die zugleich als Kohlehydrate hohen Nährwert haben, während selbst das einzige, gegenwärtig noch benutzte Kunstprodukt, das Saccharin, den Organismus unverändert verläßt. Da das Saccharin danach den Zucker nur als Süßstoff ersetzt, ist seine Verwendung vielfach gesetzlich eingeschränkt worden, es wird insbesondere in den Fällen benutzt werden, in denen Zuckergenuß aus medizinischen Rücksichten untersagt werden muß.

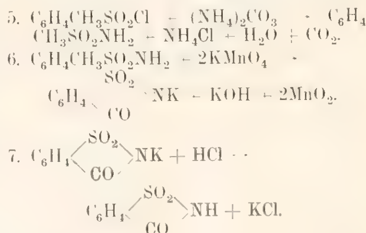
3. **Saccharinfabrikation.** Was die Darstellung der praktisch verwendeten Süßstoffe anlangt, so sei wegen der Zuckerfabrikation auf den betreffenden Spezialartikel verwiesen, und hier nur kurz die technische Saccharindarstellung skizziert.

Als Ausgangsmaterial dient Toluol, das bei einer 100° nicht überschreitenden Temperatur mit Schwefelsäure zu einem Gemisch von o-, p- und m-Toluolsulfonsäure umgesetzt wird. Die Kalksalze der Säuren werden durch Behandlung mit Soda in Natriumsalze verwandelt, die mit Chlor und Phosphortrichlorid ein Gemisch der Toluolsulfochloride liefern. Durch Zentrifugieren trennt man das schwer kristallisierende o-Derivat von den kristallisierenden Isomeren. Die beschriebenen Prozesse werden durch folgende Formeln wiedergegeben:



1. $C_6H_5CH_3 + 2H_2SO_4 = C_6H_4CH_3SO_3H + H_2SO_4 + H_2O$.
2. (o, m, p) $2C_6H_4CH_3SO_3H + CaCO_3 = [C_6H_4CH_3SO_2O]_2Ca + H_2O + CO_2$.
3. $(C_6H_4CH_3SO_2O)_2Ca + Na_2CO_3 = 2C_6H_4CH_3SO_3Na + CaCO_3$.
4. $C_6H_4CH_3SO_3Na + PCl_3 + Cl_2 = C_6H_4CH_3SO_2Cl + POCl_3 + NaCl$.

Das so gewonnene o-Toluolsulfochlorid wird mittels Ammonkarbonat in das Säureamid verwandelt, dieses endlich mit Kaliumpermanganat zum Kalisalz des Saccharins oxydiert, und aus dem Salze durch Salzsäure das Saccharin in Freiheit gesetzt, also:



5. $C_6H_4CH_3SO_2Cl + (NH_4)_2CO_3 = C_6H_4CH_3SO_2NH_2 + NH_4Cl + H_2O + CO_2$.
6. $C_6H_4CH_3SO_2NH_2 + 2KMnO_4 = C_6H_4{<}^{SO_2}_{CO}{>}NK + KOH + 2MnO_2$.
7. $C_6H_4{<}^{SO_2}_{CO}{>}NK + HCl = C_6H_4{<}^{SO_2}_{CO}{>}NH + KCl$.

Das reine Saccharin ist ein farbloser kristallisierter Stoff vom Schmelzpunkte 220°. Es ist eine Säure, die aus Karbonaten Kohlensäure in Freiheit setzt, und wird von verdünnten Säuren und Alkalien selbst bei 150° im Autoclaven nicht angegriffen. Na-

scierender Wasserstoff wirkt in alkalischer Lösung nicht ein, ebenso wirkungslos sind Permanganat, Wasserstoffsuperoxyd und Halogen in der Kälte. Salpetersäure hydrolysiert und oxydiert es erst in der Wärme.

In Wasser ist das Saccharin schwer löslich (0,25%), in Fett, Oel usw. zu 0,1%. Leicht löslich in Wasser ist das Natriumsalz, das deshalb als lösliches Saccharin in den Handel kommt. Wegen der Schwerlöslichkeit des Calciumsalzes darf Saccharin nicht in kalkhaltigem Wasser aufgelöst werden, längeres Kochen wässeriger Saccharinlösungen ist ebenfalls zu vermeiden, weil hierbei Verseifung eintritt, die den Geschmack beeinträchtigt.

Physiologisch ist, wie erwähnt, das Saccharin wegen seiner Indifferenz völlig unschädlich, es besitzt schwach antiseptische und konservierende Eigenschaften.

Literatur. *Eine Literaturzusammenstellung und zahlreiche Beispiele über Geschmack und Konstitution bringt* **S. Fränkel.** *Die Arzneimittelsynthese. Berlin 1912. — Vollständige Listen aller süß schmeckenden Stoffe sind bisher nicht zusammengestellt. Ueber Saccharin vgl. besonders das Referat von* **H. Serger** *in der Chemiker-Zeitung 1912,* 87, *829;* 89, *851 (XXXVI), „Künstliche Süßstoffe“.*

J. Lifschitz.

Süßwasserfauna.

I. Süßwasser und Meer. II. Das Medium. A. Physikalische Bedingungen in ihren Einwirkungen auf die Tierwelt. B. Chemische Bedingungen in ihren Einwirkungen auf die Tierwelt. III. Bestand der Süßwasserfauna. Protozoen: 1. Rhizopoden. 2. Heliozoen. 3. Flagellaten. 4. Infusorien. Spongien: 5. Spongillen. Coelenteraten: 6. Hydrozoen. Würmer: 7. Turbellarien. A. Rhabdocoela. B. Dendrocoela. 8. Trematoden und Temnocephaliden. 9. Cestoden. 10. Nemertinen. 11. Rotatorien. 12. Gastrotrichen. 13. Nematoden. 14. Gordiiden. 15. Mermitiden. 16. Oligochaeten. 17. Polychaeten. 18. Hirudineen. Tentaculata: 19. Bryozoen. Mollusken: 20. Gasteropoden. A. Prosobranchier. B. Pulmonaten. C. Opisthobranchier. 21. Lamellibranchiaten. Crustaceen: 22. Phyllopoden. A. Euphyllopoden. B. Cladoceren. 23. Ostracoden. 24. Copepoden. 25. Isopoden. 26. Amphipoden. 27. Schizopoden. 28. Decapoden. 29. Tardigraden. Arachnoidea: 30. Araneiden. 31. Hydracarinen. Insekten: 32. Collembola. 33. Orthopteren. 34. Plecopteren. 35. Ephemeriden. 36. Odonaten. 37. Neuropteren. A. Sialiden. B. Megalopteren. 38. Trichopteren. 39. Lepidopteren. 40. Hymenopteren. 41. Dipteren. 42. Coleopteren. 43. Rhynchoten. Vertebraten. Fische: 44. Cyclostomen. 45. Selachier. 46. Ganoiden. 47. Dipnoer. 48. Teleosteer. A. Malacopterygii. B. Ostariophysi. C. Symbranchii. D. Apodes. E. Haplomi. F. Catosteomi. G. Peresoces. H. Anacanthini. I. Acanthopterygii. K. Zeorhombi. L. Gobiiformes. M. Scleroparei. N. Jugulares. O. Opisthomi. P. Plectognathi. Amphibien: 49. Gymnophionen. 50. Urodelen. 51. Anuren. Reptilien: 52. Chelonier: A. Cryptodira. B. Pleurodira. C. Trionychoidea. 53. Ophidier. 54. Crocodilier. 55. Vögel. 56. Säugetiere. IV. Die Lebensbezirke des Süßwassers. A. Die Lebensbezirke der rheophilen Tierwelt: 1. Die Quelle. 2. Der Bergbach. 3. Fluß und Strom. B. Die Lebensbezirke der limnophilen Tierwelt: 1. Der See. a) Uferregion. b) Die Tiefenregion. c) Die Region des freien Wassers. Plankton: α) Zusammensetzung des Planktons. β) Schwebeeinrichtungen. γ) Masse, horizontale und vertikale Verbreitung des Planktons. δ) Periodizität und Zyklomorphose. ε. Arktisches und tropisches Plankton. 2. Teiche und Sümpfe. 3. Moore. 4. Periodische Gewässer. C. Subterrane Gewässer: Grundwasser, Brunnen, Höhlen. D. Uebergänge zur Landfauna: a) Ufertiere. b) Hygropetrische Fauna. c) Moosfauna. V. Die Verbreitung der Süßwasserfauna. 1. Kosmopolitismus der Süßwasserfauna. 2. Geschichte der Süßwasserfauna Mitteleuropas seit dem Tertiär. 3. Allgemeine Verbreitung der Süßwasserfauna über die Erde. A. Arktische Region. B. Nördlich gemäßigte Region. C. Tropenregion. D. Außertropische Südhemisphäre. 4. Reliktenseen. VI. Literatur.

I. Süßwasser und Meer.

Den größten Teil des Erdballs deckt das Meer: nur etwa ein Viertel umfaßt das feste Land und davon entfällt auf das Süßwasser wiederum nur ein Bruchteil.

Während die ungeheuren Flächen der Meere seit Aeonen weltumspannend ineinanderfluten und keine räumliche Schranke den Zusammenhang, die Verbreitung und den Austausch ozeanischen Lebens von Pol zu Pol hemmt, bedingt die Ansammlung des Süßwassers in getrennten Vertiefungen des Festlandes eine Zerteilung und Sonderung seines Tier- und Pflanzenlebens auf bestimmt begrenzte, sehr verschieden geartete Rinnen und Becken, wie sie uns als Strom, Fluß und Bach, als See, Tümpel, Teich und Sumpf entgegentreten. Die meisten dieser Gewässer sind — verglichen mit dem „ewigen“ Meere — geologisch noch recht jugendliche, wandelbare und vergängliche Gebilde. So hat, um nur ein Beispiel anzuführen, all den großen und tiefen Seen der Alpen und des Nordens erst die Eiszeit Ursprung und biologisches Gepräge verliehen; sie war es auch, die mit ihren Schmelzwasserströmen fast das gesamte Flußnetz Mittel- und Nordeuropas weitgehend umgestaltete und damit die Verbreitung der Tierwelt auf das nachhaltigste beeinflußte.

Man hat das Wasser im Gegensatz zum Lande das Reich des Gleichmaßes genannt. Das gilt in erster Linie für das

Meer. Das Süßwasser umfaßt nach verschiedenen Richtungen hin weit größere Kontraste. Die immer kühle klare Quelle und die lauwarme trübe Regenpfütze, der stürzende Katarakt und das nie bewegte Wasser der Seentiefen, der rinnende Tropfen an der Felswand und der breitflutende Strom, der öde Gletschertümpel und der pflanzendurchwucherte Teich — sie alle umfassen einen Wechsel und eine Vielgestaltigkeit der Lebensbedingungen, wie ihnen im Bereich des Meeres nicht leicht etwas Aehnliches zur Seite gestellt werden kann. So schlägt das Süßwasser auch biologisch eine Brücke vom Meer zum festen Land.

II. Das Medium.

A. Physikalische Bedingungen in ihren Einwirkungen auf die Tierwelt.

Der Zustand relativer Ruhe oder derjenige der stetig abwärts gerichteten Bewegung des Mediums scheidet im Süßwasser die Lebensbezirke der limnophilen und rheophilen Tierwelt. Letztere hat im Meer kein völlig gleichwertiges Gegenstück, denn den durch Ebbe und Flut sowie die Brandung bedingten Bewegungen des Wassers fehlt die stets gleichsinnige Richtung und die uferlosen Meeresströmungen besitzen weder Gefälle noch festen Untergrund.

Einer der wichtigsten physikalischen Faktoren für die gesamte Biologie des Süßwassers ist dessen Temperatur, die in unseren Breiten von 0° bis über 30° C schwankt. Sie beeinflußt teils direkt, teils indirekt als Regulator des Gasgehaltes, der Tragfähigkeit des Wassers, sehr tiefgreifend das räumliche und zeitliche Vorkommen, die Ernährung und Fortpflanzung, den Rhythmus der Entwickelung sowie in einer Reihe von Fällen auch die morphologische Gestaltung (Zyklomorphose planktonischer Flagellaten, Rotatorien und Daphniden).

Fast alle echten Süßwassertiere sind wechselwarm (poekilotherm): ihre Körpertemperatur entspricht jeweils annähernd derjenigen des umgebenden Mediums. Im Gegensatz zum Lande, wo schroffe Wechsel der Temperatur nicht selten sind, gleichen sich im Wasser alle Wärmeschwankungen nur ganz langsam und allmählich aus; Einrichtungen zur Wärmeregulierung des Tierkörpers fehlen darum hier völlig. Das sehen wir besonders deutlich bei den Fischen, die aus ihrer gewohnten Umgebung plötzlich in ein nur um 4 bis 5° C kälteres Wasser versetzt, auf diesen in der freien Natur niemals so rasch erfolgenden Temperatursprung durch deutliche Erkältungskrankheiten der Haut reagieren.

Die Eigenschaft des Wassers, bei 4° C seine größte Dichte und spezifische Schwere zu erlangen, hat zur Folge, daß das bei weiterem Sinken der Temperatur schließlich sich bildende Eis in allen nicht zu seichten Gewässern nur die Oberfläche bedeckt und dadurch die tieferen Schichten vor stärkerer Abkühlung bewahrt. Dieser Umstand läßt im Wasser das Getriebe des Lebens auch im Winter niemals stille stehen, während auf dem Lande die Gewalt des Frostes den größten Teil des Tier- und Pflanzenlebens in Schlummer zwingt.

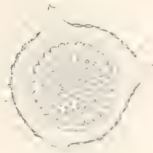
Wohl jede Tierart hat ein Optimum der Temperatur für ihre verschiedenen vitalen Funktionen. Im einzelnen schwanken aber die Ansprüche an die Temperatur des Aufenthaltsorts recht beträchtlich. Sehr zahlreiche Wassertiere sind eurytherm: weitgehenden Wärmeschwankungen des Mediums angepaßt, kommen sie in warmen und kalten Gewässern, im Sommer und Winter ziemlich gleich häufig vor. Den Gegensatz hierzu bilden die stenothermen Tiere, deren Auftreten an bestimmte nahe beieinander liegende Temperaturgrenzen gebunden ist. Unter ihnen lassen sich wieder thermophile Formen unterscheiden, die räumlich auf warme Gegenden, zeitlich auf die wärmere Jahreszeit beschränkt sind und als Gegensatz hierzu psychrophile (oder chimophile) Formen, die nur in kühlen Gewässern höherer Breitegrade sowie der Gebirge, in Quellen und Seentiefen oder im Winter die ihnen zusagenden Lebensbedingungen finden.

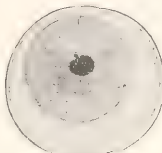
Länger dauernde ungünstige Temperaturen, wie sie, manchmal vereint mit Austrocknung, durch den zyklischen Wechsel der Jahreszeiten bedingt sind, werden in mannigfach abgestuften Ruhezuständen, Dauereiern, Cysten von sehr verschiedener Gestalt (Fig. 1 bis 7) oder in schlafartiger Lethargie überstanden. Bekannt ist in dieser Hinsicht der „Winterschlaf" von Karpfen, Schleie, Aal, Stör am Grunde der Gewässer, auf der anderen Seite der „Sommerschlaf" tropischer Dipnoer, Siluriden usw. Bei sehr warmem Wetter sollen auch bei uns die Schleien in Lethargie verfallen.

Die Wirkung der Temperatur auf die Ernährung ist besonders bei den Fischen näher untersucht: der Karpfen frißt nur bei Temperaturen zwischen 9 bis 30° C (mit einem Optimum bei etwa 25° C), bei der Forelle liegen die entsprechenden Grenzzahlen zwischen 2 bis 20° C.

Sehr beträchtlich ist der Einfluß der Temperatur auf die Fortpflanzung. In den meisten Fällen wird der Eintritt der Geschlechtsreife durch steigende Wärme gefördert; das zeigt auch die im Frühjahr bis gegen den Herbst hin immer reichere

Entfaltung der Tierwelt unserer Gewässer. Die optimalen Temperaturen für die Fortpflanzung liegen hierbei innerhalb weiter Grenzen, sind aber für die einzelnen Arten oft sehr konstant: so laicht beispielsweise der Karpfen erst dann, wenn das Wasser mindestens 19° C warm geworden ist, was bei uns je nach Lage der Gewässer in den Monaten Mai bis Juli eintritt, die Nase (Chondrostoma nasus) bei 10° C usw. Ungleich seltener sind die Fälle, wo die Laichreife an den Eintritt kühlerer Temperaturen gebunden erscheint. Zu diesen „Winterlaichern" gehört die Mehrzahl unserer heimischen Salmoniden (Lachs, Forelle, viele Coregonusarten), deren Eiablage auf die Monate November und Dezember fällt; auch die Aalraupe (Lota vulgaris) laicht


Fig. 1a.


Fig. 1b.

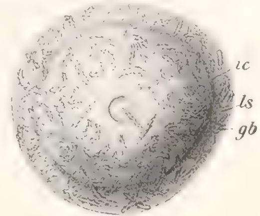


Fig. 2.

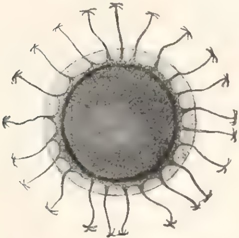
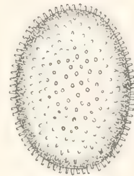
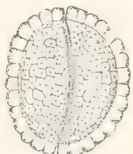


Fig. 3.


Fig. 4a.


Fig. 4b.

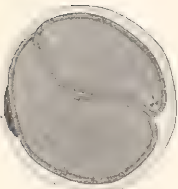


Fig. 5.


Fig. 6.

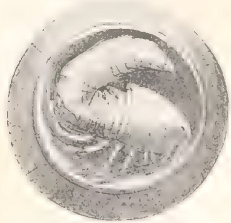

Fig. 7.

Fig. 1 bis 7. Dauerstadien von Süßwassertieren.

Fig. 1. Cysten von Protozoen. a von Microcometes, Cyste von der Schale des Rhizopoden umschlossen. Nach Lauterborn. b Cyste von Colpoda cucullus. Nach Doflein.

Fig. 2. Gemmula eines Süßwasserschwammes (Spongilla lacustris). Nach Brauers Süßwasserfauna.

Fig. 3. Statoblast einer Bryozoe (Cristatella mucedo). Nach Kraepelin.

Fig. 4. Dauereier von Rotatorien. a von Polyarthra platyptera, b von Pedalion mirum. Nach Lauterborn.

Fig. 5. Schleimcyste einer Nemertine (Stichostemma graecense). Nach Rimsky-Korsakow.

Fig. 6. Ephippium einer Daphnide (Daphne pulex). Original.

Fig. 7. Pillenförmige Schlammcyste eines Harpactiden (Canthocamptus microstaphylinus). Nach Lauterborn und Wolf.

in der kältesten Jahreszeit (November bis Februar). Von Wirbellosen bieten einige Strudelwürmer (Planaria alpina, Polycelis cornuta, Dendrocoelum lacteum), Oligochäten (Lumbriculus, Rhynchelmis), Crustaceen (Cyclops strenuus, Canthocamptus-Arten) entsprechende Beispiele.

Etwas anders liegen die Verhältnisse bei jenen Organismen des Süßwassers, die sich, wie die Rotatorien und Daphniden, zyklisch, d. h. in geregelter Abwechselung parthenogenetisch und geschlechtlich fortpflanzen. Hier ist bei den das ganze Jahr hindurch vorkommenden Formen ein direkter Einfluß der Temperatur auf den Eintritt der Geschlechtsperioden nicht nachzuweisen, letztere wiederholen sich vielmehr bei den einzelnen Arten zu ganz verschiedenen Jahreszeiten, wie bei dem Rädertier Brachionus angularis im April, Juni, August bis November, bei der Daphnide Bosmina cornuta im Mai und November usw. In diesen Fällen ist der jeweilige Eintritt der geschlechtlichen Fortpflanzung im Generationszyklus der betreffenden Arten begründet und unabhängig von bestimmten Temperaturen.

Unverkennbar ist dagegen in allen Fällen der Einfluß der Temperatur auf die Entwickelung. Kälte verzögert sie, Wärme fördert sie, auch bei jenen Formen, deren Geschlechtsprodukte nur im kühlen Wasser reifen. Sehr schön läßt sich dies bei Fischen zeigen. So bedürfen die Eier der Bachforelle etwa 410 Tagesgrade zur Entwickelung: bei 1° C durchschnittlicher täglicher Wassertemperatur würden die Eier erst nach 410 Tagen ausschlüpfen, bei 2° nach 205, bei 4° nach 102 Tagen usw. Natürlich gibt es auch hier bestimmte Grenzwerte, die ohne Schädigung nicht überschritten werden dürfen.

Neben der Temperatur spielt das Licht eine bedeutsame Rolle. Das Licht verliert nach den Versuchen von Regnard bei seinem Eindringen in das Wasser bereits in 1 m Tiefe ungefähr die Hälfte seiner Intensität; in Flüssen (Seine) ist die Abnahme schon im ersten Dezimeter sehr beträchtlich, was jedenfalls auf einer starken Absorption durch die im strömenden Wasser zahlreich mitgeführten Schwebestoffe beruht. Die Tiefe, in welcher eine weiße Scheibe unserem Auge entschwindet, wechselt nach den einzelnen Seen und auch hier wieder nach der Jahreszeit: im Winter dringen die Lichtstrahlen tiefer als im Sommer, wo auch die Organismen des Planktons als Lichtschirm wirken. So liegt die mittlere Sichtbarkeitsgrenze im Bodensee im Winter bei 6,60 m, im Sommer bei 4,49 m, im Genfersee bei 12,7 und 6,60 m. Noch viel geringere Werte ergeben sehr planktonreiche seichte Gewässer: in einem 5 bis 6 m tiefen Altwasser des Rheins verschwindet die weiße Scheibe im Winter bei 1 m Tiefe, im Sommer dagegen bereits bei 0,45 m. Hier ist also die Durchsichtigkeit im wesentlichen Funktion der Planktonquantität. Noch beträchtlich tiefer als die unserem Auge sichtbaren Strahlen dringen die chemisch wirksamen ein: Bromsilberplatten zeigten im Genfersee noch bei 170 m eine schwache Reaktion, jenseits dieser Grenze herrscht völlige Dunkelheit.

Die Abnahme des Lichtes nach der Tiefe hin setzt der assimilierenden Pflanzenwelt nach unten bestimmte Grenzen. Die Tierwelt wird hiervon weit weniger berührt und zahlreiche Formen der durchleuchteten Uferregion steigen auch in die dunkle Tiefe hinab, wo sie sich mit den eigentlichen Tiefseebewohnern mischen.

Der Mangel an Licht bewirkt meist ein Ausbleichen der Farben: milchweiß, grau, blaßrötlich sind die herrschenden Farbentöne der Dunkeltiere. Bisweilen tritt Reduktion oder völliger Schwund der Sehorgane ein, wie Niphargus, Asellus Foreli zeigen. Noch zahlreicher als in unseren Seetiefen erscheinen blinde Formen in Höhlengewässern, wo die verschiedensten Abteilungen des Tierreichs Vertreter stellen: die Amphibien den Olm (Proteus anguineus), die Fische die Gattungen Amblyopsis spelaea in nordamerikanischen sowie Lucifuga dentata in kubanischen Höhlen, die Schnecken die Gattung Lartetia (Vitrella), die Crustaceen den Brunnenkrebs Niphargus, blinde Arten der Gattung Cyclops (Cyclops teras, Cyclops Zschokkei), die Planarien Planaria cavatica und Dendrocoelum infernale. Eine Vergrößerung der Sehorgane, wie sie im Meere bei Fischen und Crustaceen der Tiefsee beobachtet wird, ist im Süßwasser bei der Tiefenvarietät des Saiblings (Salmo salvelinus var. profundus) angedeutet. Auch das riesige Auge von Bythotrephes (Fig. 14) dürfte wohl hierher gehören.

Die periodischen Schwankungen des Lichtes, wie sie durch den nach Tages- und Jahreszeit wechselnden Stand der Sonne bedingt werden, äußern ihre Wirkungen auch auf die Tierwelt der Gewässer. Dämmerung und Dunkelheit treten im Wasser früher ein und dauern länger als in der Luft. Bei beginnender Dunkelheit steigen zahlreiche Plankton-Crustaceen aus der Tiefe nach der nahrungsreicheren Oberfläche empor, bis sie der helle Sonnenschein wieder hinabscheucht. Vom Lichte räumlich und zeitlich direkt abhängig sind die grünen und braunen Flagellaten des Planktons und des Ufers, da sie, wie die Algen und höheren Pflanzen, ihre Assimilationstätigkeit nur am Tage entfalten können; sie fehlen darum

den größeren Tiefen und entwickeln sich am üppigsten im Sommer, der Zeit des größten Lichtgenusses. Als Ernährung und als Durchlüfter unserer Gewässer greifen all diese autotrophen Organismen namentlich bei Massenentfaltung bedeutungsvoll in die gesamte Biologie der Tierwelt ein; auch die Tiefseefauna zehrt dann von ihren zu Boden sinkenden Resten.

Leuchtende Tiere sind im Süßwasser, im Gegensatz zum Meere und Festland, bisher nicht bekannt geworden.

B. Chemische Bedingungen in ihren Einwirkungen auf die Tierwelt.

Die chemische Zusammensetzung des Süßwassers ist sehr verschieden von der des Meerwassers. Während das letztere nicht weniger als etwa 35 g gelöster Salze im Liter enthält, weist das Süßwasser in einem Liter nur ungefähr 0,167 g gelöster Salze auf und diese in ganz anderen Mengenverhältnissen als das Meerwasser. In unseren Flüssen und Seen überwiegen bei weitem die Karbonate (meist als Calciumkarbonat $CaCO_3$). Chloride sind nur in ganz geringen Mengen vertreten; im Meere liegen die Verhältnisse gerade umgekehrt wie folgende Gegenüberstellung erkennen läßt.

Auf je 100 Teile ~~Wasser~~ Salze entfallen im

	Flußwasser	Meerwasser
Karbonate	60,1	0,3
Sulfate	9,9	10,8
Chloride	5,2	88,7
Sonstiges	24,8	0,2

Eine so weitgehende Verschiedenheit in der chemischen Zusammensetzung des Meer- und Süßwassers muß natürlich einen Austausch mariner und fluviatiler Organismen sehr beträchtlich erschweren. Ein rascher Wechsel des Mediums tötet denn auch die allermeisten Tiere sofort, wohl wegen der plötzlichen Aenderung des osmotischen Drucks ihrer Gewebeflüssigkeiten. Einem langsamen Wechsel vermögen sich dagegen eine ganze Reihe von Tieren (Protozoen, Mollusken, Crustaceen, Fische) anzupassen, wie dies sowohl das Experiment als auch das gleichzeitige Vorkommen mancher Formen im süßen und salzigen Wasser dartut. Einen weiteren Beweis liefern die Wanderfische, die wie der Lachs und der Maifisch (Alosa) zum Laichen aus dem Meer in das Süßwasser aufsteigen, während umgekehrt unser Aal zu diesem Zweck die Tiefen des Ozeans aufsucht.

Während nun im Meerwasser trotz aller Schwankungen des absoluten Salzgehaltes das prozentuale Verhältnis der einzelnen Bestandteile zueinander auffallend konstant bleibt, so daß den marinen Organismen überall dieselben Salze in denselben Mengenverhältnissen zur Verfügung stehen, zeigen die süßen Gewässer nach dieser Richtung hin beträchtliche Verschiedenheiten. Hier bestimmt in erster Linie der geologische Untergrund die chemische Beschaffenheit des Wassers, das von dem Augenblicke an, wo es als Regen in die Erde sickert, mit Hilfe der aufgenommenen Kohlensäure die löslichen Bestandteile des Bodens angreift, auslaugt und fortführt.

Besonders auffällig tritt diese Abhängigkeit vom Untergrund in dem wechselnden Kalkgehalt unserer Gewässer zutage. So enthält beispielsweise der Neckar, der hauptsächlich das Gebiet des Jura und Muschelkalkes durchfließt, 100 bis 136 mg Kalk in einem Liter Wasser, der Rhein bei Straßburg 64,6 bis 77 mg, während die Bäche aus dem kalkarmen Urgebirge und dem Buntsandstein nur etwa 6 bis 10 mg Kalk aufweisen. Dieser Gegensatz zwischen „hartem" und „weichem" Wasser spiegelt sich überall auch im Charakter der Tier- und Pflanzenwelt wider. Die ganze sogenannte sphagnophile Fauna und Flora ist (wie das Torfmoos Sphagnum selbst) ausgesprochen kalkfeindlich. Formen wie die Gattungen Nebela, Ditrema unter den Rhizopoden, Chrysosphaerella, Palatinella, Cyclonexis, Chlorodesmos unter den Flagellaten, Copeus, Microcodites, Arthroglena, Anuraea serrulata unter den Rotatorien, Holopedium, Drepanothrix, Strebloceros unter den Daphniden meiden hartes Wasser durchaus und stellen darum kaum trügende Leitformen für kalkfreie oder doch sehr kalkarme Gewässer dar.

Der Mangel an kohlensaurem Kalk gestattet in sauren Moorgewässern wie in den Bächen und Flüssen der Granit- und Sandsteingebirge der Molluskenfauna nur eine spärliche Entwickelung; die Schalen bleiben dünn, zerbrechlich und erscheinen oft korrodiert. Eine bemerkenswerte Ausnahme macht die Flußperlmuschel (Margaritana margaritifera), welche nur kalkarme Bäche bewohnt, aber die Fähigkeit besitzt, dem sie umspülenden Wasser die darin gelösten minimalen Mengen von Kalk zu entziehen und diese während eines Jahrzehnte dauernden Lebens in dicken Schalen aufzuspeichern.

Es ist eine auffallende Erscheinung, daß trotz des hohen Gehalts an kohlensaurem Kalk im Süßwasser sessile koloniebildende Tiere mit kalkigem Skelett so gut wie völlig fehlen, während dieselben im Meere mit seinem minimalen Gehalt an Karbonaten so häufig sind. Beispiele liefern neben Korallen und Kalkschwämmen vor allem die Bryozoen, die sowohl im Meere als im Süßwasser vorkommen; während die marinen

Gattungen meist kalkige versteinerungsfähige Stöcke bilden, sind die Süßwasserformen entweder in Gallerte eingebettet oder von chitinösen Hüllen umschlossen. Nur die Gattung Paludicella lagert in ihren „Winterknospen“ Kalk ab.

Bedeutsam für den biologischen Charakter mancher Gewässern ist deren Gehalt an gelöster, organischer, fäulnisfähiger, stickstoffhaltiger Substanz. Die Quellen sind meist frei davon oder enthalten nur Spuren. Je weiter der Bach zu Tal strömt und zum Flusse sich verbreitert, desto mehr nimmt in seinen Fluten die organische Substanz zu, die den zerfallenden Resten abgestorbener Tiere und Pflanzen des Gewässers und seiner Umgebung entstammt. Zu diesen natürlichen „Verunreinigungen“ treten in Kulturländern immer mehr künstliche hinzu in Gestalt von Abwässern aus menschlichen Siedelungen, die neben der organischen Substanz meist auch reich an Salzen sind; sie haben, im Uebermaße eingeführt, den biologischen Charakter mancher Bäche und selbst Flüsse vielerorts bereits völlig verändert. Während es in strömenden Gewässern, solange dieselben sich noch im Naturzustand befinden, nur selten und nur ganz lokal zu dauerden Anreicherungen von faulender organischer Substanz kommt, da die fließende Welle diese stetig verteilt, entführt und der Selbstreinigung durch die Tier- und Pflanzenwelt preisgibt, kann in manchen stagnierenden Gewässern die „natürliche Selbstverunreinigung“ einen solchen Grad erreichen, daß sie der gesamten Fauna und Flora ihren Stempel aufdrückt.

Das ist besonders in kleinen vegetationsreichen Tümpeln und Teichen, seltener in Seen der Fall. Hier bilden die Reste der im Herbst absterbenden und zerfallenden Pflanzenwelt eine mächtige Schicht organischen Schlammes, welcher Schauplatz lebhafter Fäulnis- und Gärungsvorgänge ist, wobei stets beträchtliche Mengen lebensfeindlicher Gase wie Schwefelwasserstoff, Methan usw. entbunden werden, während Sauerstoff meist fehlt. In diesem stinkenden, an gelösten organischen Verbindungen überreichen Schlamme lebt eine höchst eigentümliche sapropelische Tierwelt, die eine Reihe charakteristischer nur hier vorkommender Leitformen birgt. Hierher gehören besonders gewisse Rhizopoden, vor allem Pelomyxa palustris, dann eine stattliche Reihe von Infusorien, wie die ganze Familie der Ctenostomiden (Discomorpha, Pelodinium), weiter die Gattungen Pelamphora, Dactylochlamys, Caenomorpha, Metopus u. a. m. Die Rotatorien sind durch die Gattungen Diplois, Diplacidium, Atrochus, die Gastrotrichen durch Dasydites, Stylochaeta, Gossea usw. vertreten.

Man hat die Lebensgenossenschaften der stärker verunreinigtes Wasser liebenden Organismen als Saprobien den an reines Wasser gebundenen Katarrhobien (besser wohl Akeratobien[1]) gegenübergestellt, doch sind beide Extreme durch alle Uebergänge verbunden. Zu den typischen Saprozoen zählen neben den oben genannten sapropelischen Formen von Protozoen noch Infusorien wie Paramaecium, Colpidium, Glaucoma, Carchesium Lachmanni, Oligochaeten wie Tubifex, Limnodrilus, gewisse Nematoden, Fliegenlarven der Gattungen Eristalis, Ptychoptera, Psychoda sowie zahlreiche Vertreter der Familie der Chironomiden (Tendipediden). Eine mäßige Zufuhr stickstoffhaltiger organischer Substanz, also eine Art „Düngung“ der Gewässer, wie sie in kultivierten Gegenden durch Abwässer, in der freien Natur durch die Exkremente kolonienweise brütender Vogelscharen (z. B. der Lachmöve Xema ridibundum) bewirkt werden kann, führt namentlich in kalkreichen Teichen, in kleinen Seen während des Sommers oft zu einer äußerst üppigen Entfaltung planktonischer Algen und Flagellaten; diese Ueberfülle an Nahrung hat eine entsprechende Massenentwickelung von Tieren, besonders Rotatorien der Gattungen Brachionus, Schizocerca usw. sowie zahlreicher Crustaceen zur Folge, die als ausgiebiges Mastfutter den jährlichen Zuwachs der Fische sehr beträchtlich zu steigern vermögen.

Reines Wasser verlangen fast alle sphagnophilen und die überwiegende Mehrzahl der rheophilen Tiere unserer Bäche und Flüsse. Besonders empfindlich nach dieser Richtung hin erscheinen gewisse Turbellarien (Polycelis cornuta), von Schnecken die Bythinellen, von Muscheln Margaritana, von Crustaceen der Edelkrebs Astacus nobilis, dann Niphargus, viele Ephemeriden-Perliden- und Trichopteren-Larven, unter den Fischen die Salmoniden.

Von der größten Bedeutung für das gesamte Leben im Süßwasser ist dessen Gehalt an gelösten Gasen, vor allem an Sauerstoff, der Atemluft für die Tiere und Pflanzen. Vom Luftdruck abgesehen, wird der jeweilige Gasgehalt des Wassers zunächst von dessen Temperatur bestimmt, insofern als bei steigender Temperatur der Gasgehalt stetig abnimmt: Wasser von 30° C enthält nur noch die Hälfte des Sauerstoffs, den es bei 0° zu halten vermochte. Genauere Angaben bringt folgende Tabelle, die übersichtlich zeigt wie viel Kubikzenti-

[1] ἀκέρατον ὕδωρ reines unvermischtes Wasser.

meter Luft, bestehend aus Sauerstoff und Stickstoff, ein Liter Wasser bei verschiedener Temperatur enthält:

Temperatur	Luft	Sauerstoff	Stickstoff
0°	28,80	10,24	18,56
5°	25,43	8,98	16,45
10°	22,64	7,96	14,68
15°	20,45	7,15	13,30
20°	18,69	6,50	12,19
25°	17,28	5,96	11,32
30°	16,07	5,48	10,59

Eine Steigerung des Sauerstoffgehaltes zeigen lebhaft strömende Gewässer, besonders dort, wo das Wasser schäumend über Felsen und Wehre stürzt und dabei viel Luft mit sich reißt; diese Stellen werden darum auch im heißen Sommer mit besonderer Vorliebe von den Forellen aufgesucht. In stehenden Gewässern reicht aber die mechanische Absorption atmosphärischer Luft selbst bei starker Wellenbewegung nicht aus, um den dauernden Sauerstoffverlust auszugleichen, den die nie aussetzende Atmung der Tiere und Pflanzen bewirkt. Hier müssen also noch andere Sauerstoffquellen zur Verfügung stehen. Als solche haben die Forschungen der letzten beiden Dezennien die grünen Pflanzen und die Chromatophoren führenden Flagellaten kennen gelehrt, die bei ihrer Assimilationstätigkeit im Sonnenlicht Sauerstoff abspalten, oft in Mengen, die weit über die in obenstehender Tabelle enthaltenen Werte hinausgehen: wurden doch in einem von grünen Flagellaten (Euglena) erfüllten Teiche im Sonnenlicht nicht weniger als 24 ccm Sauerstoff im Liter festgestellt. Dieser phytogene Sauerstoff geht indessen im Dunkel der Nacht, wo die Assimilation ruht, die Atmung der Tiere und Pflanzen aber fortdauert, bald wieder sehr beträchtlich zurück; das gleiche findet im Winter statt, wenn eine schneebedeckte Eiskruste die Gewässer überzieht. Es kann dann zu einem weitgehenden Sauerstoffschwund kommen, ganz besonders in Gewässern, die reich an gelöster organischer Substanz sind und darum Massen von Bakterien enthalten, die bei der oxydativen Spaltung organischer Verbindungen sehr beträchtliche Mengen von Sauerstoff verbrauchen.

Im einzelnen erscheinen die Ansprüche, welche die verschiedenen Tiere an den Sauerstoffgehalt ihrer Wohngewässer stellen, sehr verschieden abgestuft. Ein starkes Sauerstoffbedürfnis haben zunächst die meisten Planktontiere der Seen, dann die überwiegende Mehrzahl der rheophilen Organismen. Unter den Fischen sind in dieser Hinsicht neben Zander, Barsch und Hecht besonders empfindlich die Salmoniden, welche normalerweise ein Wasser mit 7 bis 8 ccm Sauerstoff im Liter verlangen, und an Erstickung eingehen, wenn dieser Gehalt auf etwa 1,5 ccm sinkt. Viel resistenter sind die stagnierende schlammige Gewässer bewohnenden Cypriniden, ganz besonders die Karausche (Carassius vulgaris), die bei 3 bis 4 ccm Sauerstoff noch ausgezeichnet gedeihen und erst bei 0,5 ccm Zeichen von Asphyxie erkennen lassen. Genügende Sauerstoffzufuhr läßt viele Reinwassertiere auch verunreinigtes Wasser noch längere Zeit ohne Schaden ertragen.

Hochgradiger Sauerstoffmangel, der sich bis zum völligen Schwund dieses Gases steigern kann, herrscht in dem faulenden bakteriendurchwucherten, an Schwefelwasserstoff und Methan reichen Schlamm am Grunde vieler stagnierender vegetationsreicher Gewässer. Die ganze oben erwähnte sapropelische Fauna zeigt minimale Sauerstoffbedürfnisse und vermag selbst völlig anaerob zu leben; auch gewisse Cyclopiden, Harpactiden, Ostracoden besitzen diese Fähigkeit. Die Aufspeicherung von Paraglykogen im Körper typisch sapropeler Organismen (Pelomyxa, Infusorien, Rotifer usw.) deutet darauf hin, daß hier die Betriebsenergie für die vitalen Funktionen durch hydrolytische Spaltung dieses Kohlehydrates, also auf dem Wege der sogenannten intramolekularen Atmung gewonnen wird.

III. Bestand der Süßwasserfauna.

Während im Meere fast sämtliche überhaupt im Wasser vorkommenden Abteilungen des Tierreichs vertreten sind, fehlen dem Süßwasser zahlreiche Gruppen völlig. Hierher gehören von den Protozoen die Radiolarien und Foraminiferen, die Mesozoen, unter den Coelenteraten die Calci- und Ceratospongien, die Anthozoen, Siphonophoren, Ctenophoren, unter den Würmern die Gephyreen, Kinorhynchen, Chaetognathen, weiter alle Echinodermen, die Pterobranchier, Brachiopoden, unter den Arthropoden die Cirripedien, Pantopoden, unter den Mollusken die Amphineuren, Pteropoden, Heteropoden, Cephalopoden, unter den Chordaten die Tunikaten und Acranier. Ganz auf das Süßwasser beschränkt erscheinen von höheren systematischen Kategorien eigentlich nur die Amphibien und Dipnoer; mit verschwindenden Ausnahmen auch die Wasserinsekten, weiter die überwiegende Mehrzahl der Heliozoen, Gastrotrichen, Oligochaeten, Euphyllopoden, Hydrachniden, Ganoiden. —

Im folgenden soll nun versucht werden in systematischer Reihenfolge den Anteil der einzelnen Tierklassen am Gesamtbestand der Süßwasserfauna kurz zu charakterisieren.

Protozoen.

1. **Rhizopoden.** Die Rhizopoden finden sich sowohl in nackten (Amoeba) als in beschalten Gattungen (Difflugia, Arcella, Euglypha)

fast überall und in den verschiedensten Gewässern, meist im Schlamme, auf Diatomeenschlick oder an Pflanzen kriechend; sie fehlen auch dem feuchten Moose der Bäume und Felsen nicht. Sphagnophil sind Ditrema, Placocysta, Hyalosphenia papilio und die meisten Arten der Gattung Nebela. An Kalk gebunden erscheint Quadrula irregularis, die als einziger Süßwasserrhizopode ein Gehäuse von Kalkplättchen baut. Der Tiefenfauna unserer Seen gehört eine ganze Reihe von Gattungen an, darunter einige eigentümliche (Diplogromia Brunneri); manche von ihnen treten aber auch in seichteren Gewässern auf, wenn diese nur freie Schlickflächen aufweisen. Als Mitglieder des Planktons werden einige Difflugia-Arten aufgeführt. Autotroph mit Hilfe blaugrüner Chromatophoren ernährt sich Paulinella chromatophora.

2. **Heliozoen.** Eine ähnliche Verbreitung und Lebensweise wie die Rhizopoden zeigen die Heliozoen, die besonders Moorgewässer bevölkern, aber nur selten in größerer Individuenzahl auftreten. In der Tiefsee sehr spärlich, sind sie im Plankton durch eine weitverbreitete charakteristische Form (Rhaphidocystis lemani) vertreten. Festsitzend ist Clathrulina elegans.

3. **Flagellaten.** Sehr groß und systematisch noch lange nicht erschöpft ist der Formenreichtum der Flagellaten, von denen zahlreiche Arten zu Massenentfaltungen neigen. Die Chromatophoren führenden autotrophen Gattungen spielen, wie schon erwähnt, als Urnahrung und als Durchlüfter der Gewässer eine wichtige Rolle; farblose Formen zehren faulende organische Substanzen auf. Eigentliche Schlickformen sind nicht häufig (Urceolus, Dinema), weswegen wohl auch die Tiefsee keine charakteristischen Vertreter hat. Die Mehrzahl der Flagellaten lebt zwischen Pflanzen und im freien Wasser, das sie bei üppiger Entwicklung bald grün (Chlamydomonas, Euglena) bald rot (Euglena sanguinea) bald braun (Synura) zu färben vermögen. Regenwassertümpel in Felsgestein erfüllen Stephanosphaera und Sphaerella (Haematococcus) pluvialis, dem schmelzenden Schnee der Arktis und unserer Hochgebirge verleiht Sphaerella nivalis weithin karmoisinrote Farbentöne. Ausgesprochen sphagnophil sind besonders einige Chrysomonadinen (Cyclonexis, Chlorodesmos, Palatinella), weiter die fächerförmigen Kolonien von Rhipidodendron; saprob Euglena viridis, dann die farblosen Gattungen Bodo, Hexamitus, Polytoma. Nicht ganz unbeträchtlich ist auch die Zahl geißeltragender Ento- und Ectoparasiten an Süßwassertieren: Costia necatrix bewirkt ausgedehnte Epidemien unter Teichfischen. Die meist von einem Cellulosepanzer umschlossenen Dinoflagellaten stellen in Ceratium hirundinella eine sehr weit verbreitete, zu beträchtlichen lokalen und temporalen Variationen neigende Planktonform; neben diesem finden sich Arten der Gattungen Peridinium (P. tabulatum), Glenodinium, Gymnodinium, Gonyaulax apiculata oft zahlreich im freien Wasser von Seen und Teichen. Moorformen sind Gymnodinium fuscum und Peridinium limbatum. Animalisch lebt das farblose Gymnodinium vorticella und G. helveticum.

4. **Infusorien.** Der größte Reichtum an Infusorien entfaltet sich im Süßwasser, wo auch die ansehnlichsten Vertreter vorkommen: die Gallertkugeln von Ophrydium versatile erreichen über Apfelgröße. Massenentfaltungen sind selten, am ehesten noch bei gewissen saproben Formen und dann bei den Kolonien bildenden Peritrichen (Epistylis, Carchesium), welche nicht selten Steine, Pflanzen oder Tiere in schimmelartige Wucherungen überziehen; auch Stentor-Arten treten bisweilen massenhaft auf. Die Mehrzahl der Infusorien lebt in vegetationsreichen Kleingewässern; typische Schlammbewohner sind außer den früher genannten sapropelischen Formen noch die Gattungen Loxodes, Bursaria. Dem Plankton von Seen gehören Codonella, Tintinnidium, Staurophrya an, in Altwassern und Teichen kommen noch Didinium, Disematostoma, Holophrya nigricans hinzu. In die Tiefsee steigen nur wenige allgemein verbreitete Formen hinab; am häufigsten sind hier noch sessile Gattungen auf Crustaceen, Insektenlarven (Epistylis, Opercularia). Rheophil scheint Acineta grandis. Auffallend gering ist die Zahl sphagnophiler Infusorien (Drepanomonas, Trichopelma). Weit zahlreicher, auch in der Individuenmenge treten saprobe Gattungen auf, unter denen namentlich den Bakterienfressern wie Paramaecium, Glaucoma, Colpidium, ein nicht unbeträchtlicher Anteil an der Selbstreinigung verschmutzter Gewässer zukommt. Parasitär befällt Ichthyophthirius oft massenhaft Fische; entoparasitisch im Innern von Würmern, Mollusken usw. leben Anoplophrya, Hoplitophrya.

Spongien.

5. **Spongillen.** Als Vertreter der im Meere so reich entwickelten Schwämme sind in das Süßwasser nur die zu den Kieselschwämmen gehörigen Spongillen eingedrungen, die alle Erdteile bewohnen. Süßwasserschwämme finden sich in stehenden und fließenden Gewässern, wo sie als oft recht massige Polster oder Krusten Steine, Holzwerk, Pflanzen, Muschel- und Schneckenschalen überziehen. Sie gehören hauptsächlich dem Seichtwasser an und finden sich in Seen selten tiefer als 50 m; nur die Gattung Lubomirskia steigt im Baikalsee bis etwa 100 m hinab. Die Hauptentwickelung der Spongillen fällt in unseren Breiten auf die wärmere Jahreszeit; Ueberwinterung kommt bei Ephydatia besonders in Seen vor. Gegen den Herbst — in den Tropen bei Beginn der Trockenperiode — werden eigenartige kugelige Dauerzustände, die Gemmulae gebildet, welche Austrocknung und Einfrieren ertragen. In Europa am weitesten verbreitet ist die kosmopolitische recht variable Gattung Spongilla sowie Ephydatia; auf einzelne Fundorte beschränkt sind bis jetzt Trochospongilla und Carterius Stepanovii (Rußland, Böhmen, Rheinpfalz). Der Balaton in Ungarn beherbergt die indische Spongilla Carteri, der Baikalsee ist charakterisiert durch das Vorkommen der riesigen Lubomirskien (ohne Gemmulae), die auch im Behringsmeer vorkommen. Tropische Gattungen sind in Amerika Uruguaya, Parmula,

Tubella, von der eine Art (Tubella pennsylvanica) weit nach Nordamerika hinaufdringt. Afrika besitzt Potamolepis.

Coelenteraten.

6. **Hydrozoen.** Noch spärlicher als mit Spongien ist das Süßwasser mit eigentlichen Coelenteraten bedacht. Am verbreitetsten ist die Gattung Hydra in mehreren Arten, die auch in den Tiefen der Seen — im Genfersee bis 300 m — noch vorkommt. Die verzweigte Stöcke bildende Cordylophora lacustris gedeiht am üppigsten im Brackwasser, findet sich bei Berlin, Hamburg, in der Seine bei Paris usw. auch im Süßwasser. Als parasitischer Hydroidpolyp erweist sich das seltsame Polypodium hydriforme, das in der Wolga an Störeiern lebt. Zu diesen sessilen Formen kommen auch freischwimmende kraspedote Süßwasser-Medusen hinzu. Hierher gehört Limnocnida tanganjicae, die über einen großen Teil von Afrika (Tanganjika, Viktoria Nyanza, Tschad, Niger usw.) verbreitet ist und auch aus indischen Flüssen angegeben wird (Fig. 8). Eine zweite Gattung Limnocodium war in L. Sowerbyi langere

Fig. 8. Süßwassermeduse Limnocnida tanganjicae. Nach Browne. Aus Steuers Planktonkunde.

Zeit nur aus Warmwasserteichen botanischer Gärten (Kew, München, Lyon, Nordamerika) bekannt; neuerdings ist sie auch freilebend im Jangtsekiang 1000 Seemeilen oberhalb dessen Mündung gefangen worden (Limnocodium Kawaii). Weiter verbreitet dürfte auch Microhydra Ryderi sein, deren Polypen im fließenden Wasser zwischen Bryozoen usw. sitzen, und hier zeitweise Medusen knospen lassen. Ursprünglich aus Nordamerika beschrieben, gehört Microhydra nach Funden in Straßburg, im Finow-Kanal (hier die Meduse) jetzt auch der deutschen Fauna an. Flüsse Trinidads bewohnt Halmanises lacustris. Von den Discomedusen steigt die große Crambessa tagi bei Lissabon weit in den Tajo hinauf.

Würmer.

7. **Turbellarien.** 7a) Rhabdocoela. Die rhabdocoelen Turbellarien bewohnen in weiter Verbreitung sehr verschiedenartige meist stehende Gewässer, zeigen aber im Vorkommen der einzelnen Gattungen und Arten vielfach eine starke Abhängigkeit von bestimmten Bedingungen der nächsten Umwelt sowie auch der Temperatur. Die Verschleppung erfolgt hauptsächlich auf dem Wege passiver Migration durch hartschalige Eier, die auch den Bestand der Art über Zeiten der Trockenheit oder ungünstiger Temperaturen erhalten. Als Nahrung dienen einigen Formen mikroskopische Algen, Flagellaten, organischer Detritus; die Mehrzahl aber lebt räuberisch von Infusorien, Rotatorien, Daphniden und Oligochaeten. Rhynchoscolex sitzt als Ektoparasit auf limicolen Oligochaeten (Lumbriculus), deren Blut er saugt; Mesostomum aselli schmarotzt in der Bruttasche von Asellus aquaticus.

Bevorzugte Aufenthaltsorte rhabdocoeler Turbellarien sind zunächst kleine Tümpel in Wiesen und Wäldern, wie sie im Frühling bei der Schneeschmelze entstehen und im Sommer wieder zu versiegen pflegen. Hier finden sich vor allem Vertreter der Gattung Dalyellia (Vortex), darunter die weit verbreitete durch Zoochlorellen sammtgrün gefärbte Dalyellia viridis, weiter Arten von Catenula, Stenostomum, Prorhynchus, Olisthanella, gewisse Mesostomiden usw. Sphagnumtümpel von Hochmooren bergen Fuhrmannia turgida, Castrada sphagnetorum. Eine etwas andere Zusammensetzung der Fauna zeigen perennierende Gewässer, Teiche, Altwasser und Seen mit üppiger Vegetation und Schlammgrund. Hier beleben während der wärmeren Jahreszeit zahlreiche Rhabdocoelen die Bestände der submersen Pflanzen, unter ihnen unsere größten Formen wie Mesostomum Ehrenbergi, M. Craci, M. tetragonum, die bis 1,5 cm lang werden, weiter Vertreter der Gattungen Castrada, Strongylostomum, von der Strongylostomum radiatum öfter auch im Plankton von Seen gefunden wird. Ueberwinterung bezw. ein Vorkommen das ganze Jahr hindurch ist bei Gyrator hermaphroditus, Stenostomum leucops, Microstoma lineare, dann bei Arten von Prorhynchus, Dalyellia und Mesostomum festgestellt. Bewohner des Grundschlammes und Schlicks sind vor allem die wenigen Vertreter der alloiocoelen Turbellarien im Süßwasser. Am bekanntesten von ihnen sind Plagiostomum lemani und Otomesostoma auditivum als Mitglieder der Tiefenfauna unserer Seen; Plagiostomum kommt auch auf Schlickgrund seichter Gewässer besonders im Winter vor, Otomesostoma steigt in den Alpen über 2000 m empor. Weiter gehören hierher die blinden Bothrioplaniden, die mit dem Grundwasser auch in tiefe lichtlose Brunnen dringen. Quellen von Gebirgsbächen bewohnt Prorhynchus fontinalis, in feuchten Moos kriecht Prorhynchus sphyrocephalus.

Von tiergeographischem Interesse ist das Vorkommen sonst mariner Gattungen im Süßwasser: hierher gehören außer den Alloiocoelen noch Polycystis Goettei bei Straßburg, Trigonostomum neocomense und wohl auch Phonorhynchus lemanus in Seen der Schweiz.

7b) Dendrocoela. Die dendrocoelen Turbellarien oder Tricladen umfassen im Gegensatz zu den rhabdocoelen größere bis sehr große Strudelwürmer, welche in stehenden und besonders in fließenden Gewässern verbreitet sind. Als lichtscheue und meist auch ziemlich träge Tiere kriechen sie an der Unterseite von Steinen, Holzwerk und Blättern, zwischen eingeschwemmtem Laub; als Nahrung dienen kleine Würmer, Crustaceen, Insektenlarven. Die Eier werden in kugeligen braunen Kokons an feste Substrate angeheftet; ungeschlechtliche Fortpflanzung durch Querteilung ist bei Planaria und Polycelis beobachtet worden.

Während unsere häufigste Triclade Dendrocoelum lacteum ohne Unterschied stehende und fließende Gewässer, seichte Tümpel und als var. bathycola auch die großen Tiefen der Seen besiedelt, zeigt der Bestand der anderen Arten fast durchweg eine deutliche Sonderung in limnophile und rheophile Formen und dies oft in derselben Gattung. Zu den Bewohnern stehender oder ganz langsam fließender pflanzenreicher Gewässer gehören Planaria lugubris, weiter Polycelis nigra, die in einer lehmgelben Varietät auch ziemlich tief in Seen hinabsteigt. Rheophile Tricladen sind vor allem Planaria alpina, Planaria gonocephala, Polycelis cornuta. Planaria alpina ist eine streng psychrophile Form, die kalkreiche Gewässer bevorzugt. Sie bewohnt die kalten Quellen und Bäche der Alpen, der Gebirge Zentral- und Nordeuropas und kommt auch am Grunde von Seen vor; in den Niederungen tritt sie nur ganz sporadisch auf (Bäche auf Rügen, Grundwasserquellen und Gießen des Rheintals oberhalb des Bodensees.) In Gebirgen Südeuropas erscheint die Alpenplanarie durch verwandte Formen ersetzt, die sich durch eine merkwürdige Vervielfachung ihres Saugrüssels (Polypharyngie) auszeichnen, wie beispielsweise Planaria montenegrina. Etwas wärmeres Wasser als Planaria alpina erträgt Polycelis cornuta, die darum in vielen Bächen erst unterhalb der von Planaria alpina besetzten Strecke auftritt, in kalkarmen Bächen vielfach aber bis zu deren Quellen vordringt und diese dann allein beherrscht. Die Art ist auch in Nordafrika, in Bächen des Atlas gefunden worden. Die größten Wärmeschwankungen vermag Planaria gonocephala zu ertragen, die hauptsächlich den Unterlauf der Bäche, die Flüsse und Ströme der Niederungen bewohnt. Außerhalb Europas wurden sie in Algier sowie auf den Kanarischen Inseln nachgewiesen. Höhlenbewohner stellen unter den Tricladen Planaria cavatica und Dendrocoelum infernale dar; beide sind blind.

Den größten Reichtum an dendrocoelen Turbellarien unter allen Gewässern der Erde weist jedenfalls der Baikalsee auf. Die Zahl der hier vorkommenden Arten wird mit über hundert angegeben, darunter Formen von geradezu riesenhaften Dimensionen wie der 12 cm lange und 4 cm breite Rimacephalus bistriatus. Noch in 1000 m Tiefe lebt hier eine schneeweise Planarie von 15 cm Länge und 6 cm Breite, deren Kokons die Größe von Vogeleiern (1 auf 2 cm) erreichen.

8. **Trematoden und Temnocephaliden.** Es ist nicht möglich, an dieser Stelle auf die überaus zahlreichen Trematoden und Cestoden einzugehen, welche als Ekto- und Entoparasiten, Wassersäuger und Wasservögel, dann ganz besonders Fische, Amphibien und Mollusken, weiter auch einige Insekten und Würmern bewohnen. Frei im Wasser leben eine Zeitlang die bewimperten Larvenstadien der Trematoden, die sogenannten Miracidien, ebenso eine Anzahl Cercarien derselben. Hierher gehört die aus Muscheln ausschwärmende Cercarie von Bucephalus polymorphus, welche mit Hilfe eines langen hornartig geschweiften Gabelschwanzes im Wasser auf und ab schwebt, weiter die durchsichtige bis 6 mm lange Cercaria mirabilis, welche ähnliche Bewegungen vollführt.

Tiergeographisches Interesse beansprucht die den Uebergang von den Turbellarien zu den Trematoden bildende Familie der Temnocephaliden, deren Angehörige auf dem Panzer und den Kiemen von Krebsen, dann auf Schildkröten usw. leben. Ursprünglich nur aus den Tropen und Subtropen bekannt, ist die Familie neuerdings auch für Europa nachgewiesen, wo im Skutari-See Skutaria didactyla an den Kiemen der Süßwassergarneele Palaemonetes parasitiert.

9. **Cestoden.** Unter den Cestoden sind Ligula avium sowie Caryophyllaeus mutabilis wiederholt frei im Wasser, besonders in der Tiefe von Seen beobachtet worden.

10. **Nemertinen.** Die im Meere weit verbreiteten und bisweilen mehrere Meter Länge erreichenden Schnurwürmer sind im Süßwasser nur durch ganz wenige und sehr unscheinbare Formen vertreten. Am verbreitetsten dürfte das rötlich gefärbte Stichostemma graecense sein, welches sehr verborgen an der Unterseite von Steinen, an Pflanzen in stehenden und fließenden Gewässern lebt und sich in Schleimcysten einzukapseln vermag (Fig. 5).

11. **Rotatorien.** Die Rotatorien sind wie die Protozoen in zahlreichen identischen Arten und öfter selbst Varietäten über die ganze Erde verbreitet. Eigentliche Tropenformen scheinen zu fehlen, da die lange hierfür angesehene Gattung Trochosphaera auch in Nordamerika vorkommt. Als ganz überwiegend limnophile Organismen haben die Rädertiere ihre Hauptentfaltung in vegetationsreichen Teichen, Altwassern und seichten Seen, wo sie schwimmend und kriechend das Gewirre der Pflanzen, den Schlamm und das freie Wasser bevölkern; aus der Tiefsee sind bis jetzt nur wenige allgemein verbreitete Arten bekannt geworden. Zwischen den Pflanzen leben vor allem die Familien der Rattuliden, Euchlaniden, Salpiniden und Coluriden; hier sitzen auch an Stengeln und Blättern festgeheftet die Rhizoten, bald einzeln (Floscularia, Melicerta), bald zu Kolonien vereint (Lacinularia). Im Schlamme führen die sapropelischen Formen wie Atrochus, Diplacidium, Diplois ein verborgenes Dasein; auf diatomeenreichen Schlick gleiten Arten von Notommata, Diglena, Diaschiza sowie die träge Taphrocampa, daneben Vertreter der Philodiniden wie Rotifer und Actinurus. Im freien Wasser aller nicht zu tiefen Gewässer bilden die Rotatorien einen Hauptbestandteil der Planktons und gerade diese Massenentfaltung von Rädertieren ist es, die dem Plankton des Süßwassers einen so

charakteristischen Zug gegenüber demjenigen des Meeres verleiht. Zu den pelagischen Formen gehören die glasartig durchsichtigen Asplanchnen, Synchaeten und Triarthren, Pedalion, weiter die gepanzerten Anuraeen, Anapodiden und Ploesomatiden, sowie zahlreiche Brachioniden und einige Rattuliden; die Rhizoten sind durch freischwimmende Flosculariaarten sowie die Gattungen Conochilus und Conochiloides vertreten.

Ausgesprochen rheophil ist im Süßwasser Furcularia Reinhardti, die sonst die Küsten unserer Meere bewohnt. Sphagnophil in Hochmoortümpeln leben Anuraea serrulata, Dinocharis intermedia, Copeus usw. Leicht austrocknende Regenpfützen sind die Hauptfundorte von Hydatina senta. Mit noch geringeren Wassermengen nehmen die sogenannten Erdrotatorien, hauptsächlich Angehörige der Gattungen Callidina und Philodina, vorlieb. Sie hausen in Moospolstern und Flechtenkrusten an Bäumen und Felsen, und leben erst auf, wenn ein Regen ihren Aufenthalt durchfeuchtet; die Trockenzeit überdauern sie kontrahiert und von einer Gallerthülle umgeben in lethargischem Zustand, der sie den extremsten Temperaturen trotzen läßt. Parasiten sind unter den Rädertieren selten. In Gallen der Grünalge Vaucheria lebt Proales Wernecki, im Darm von Würmern schmarotzt Albertia.

Zahlreiche Rotatorien sind eurytherm und finden sich das ganze Jahr hindurch vor. Daneben gibt es aber auch eine ganze Anzahl stenothermer Formen, die entweder auf die wärmere oder in einzelnen Fällen auch auf die kältere Jahreszeit beschränkt sind; zu den ersteren gehören u. a. die Gattungen Pedalion, Schizocerca, Anuraeopsis, zu der letzteren gewisse Notholcaarten. Die perennierende Anuraea cochlearis zeigt in Abhängigkeit vom jährlichen Gang der Wassertemperatur bestimmt gerichtete Gestaltsveränderungen des Panzers (Zyklomorphose), die zur Ausprägung besonderer Sommervarietäten führen.

Die Verbreitung der Rotatorien erfolgt hauptsächlich durch hartschalige Dauereier, die als Abschluß einer längeren oder kürzeren Reihe parthenogenetischer Generationen durch Befruchtung gebildet werden; sie entwickeln sich erst nach einer Ruheperiode und sind gegen Temperaturverschiedenheiten wie gegen Austrocknung sehr resistent. Der Eintritt der Geschlechtsperiode und damit die Bildung von Dauereiern erfolgt bei den verschiedenen Gattungen verschieden oft: bei den monozyklischen Rotatorien zu den beispielsweise die oben genannten „Sommerformen" gehören, tritt der Vorgang im Laufe eines Jahres nur einmal ein, bei den dizyklischen und polyzyklischen zwei oder mehrere Male. Ausgesprochen polyzyklisch ist Hydatina senta: diese Bewohnerin ephemerer Tümpel bildet oft schon in der zweiten Generation Dauereier, die den Bestand der Kolonien über jede Austrocknung der Wohngewässer erhalten.

12. **Gastrotrichen.** Die kleine Ordnung der Gastrotrichen umfaßt neben einigen zwischen Wasserpflanzen lebenden Formen hauptsächlich Schlammbewohner, die in oft recht bizarren Gestalten (Dasydites, Stylochaeta) sapropelisch im Schlamme von Teichen oder in Sphagnum-Tümpeln ein sehr verborgenes Dasein führen, hier wie dort immer in sehr geringer Individuenzahl. Am artenreichsten ist die Gattung Chaetonotus, die auch in der Tiefe von Seen vertreten ist; einige Arten bewohnen auch triefende Moospolster überrieselter Felswände.

13. **Nematoden.** Das Süßwasser beherbergt neben Jugendstadien parasitischer Formen auch zahlreiche freilebende Nematoden, fast durchweg sehr kleine unscheinbare Tiere von großer Einförmigkeit der äußeren Körpergestalt. Ihr Hauptaufenthalt ist der Schlamm und Schlick am Grunde der verschiedensten Gewässer, Algenrasen usw., vielen genügt auch die feuchte Erde von Wiesen oder das Moos an Bäumen und Felsen. Manche Arten leben mehr oder weniger saprob zwischen zerfallenden Pflanzen wie Diplogaster rivalis, Rhabditis fluviatilis, Arten von Monhystera, Dorylaimus usw. Weiter sind Nematoden ständige Mitglieder der Tiefseefauna: Diplogaster crassoides und Diplogaster Zschokkei sind bis jetzt nur hier gefunden worden. Zwischen Moosrasen fließender Gewässer lebt die mit roten Augenflecken versehene Chromadora bioculata. Als Nahrung dienen feinster organischer Detritus, seltener kleinste Algen oder Pflanzensäfte.

Unter den parasitischen Nematoden verdient eine besondere Erwähnung die seltsame schlauchförmige Buddenbrockia plumatellae, die in der Leibeshöhle von Bryozoen schmarotzt.

14. **Gordiiden.** Die Gordiiden parasitieren in ihrer Jugend in verschiedenen Insekten sowie in Fischen; nur zur Zeit der Geschlechtsreife gelangen sie, bisweilen zu bestimmten Jahreszeiten, in das freie Wasser von Seen, Teichen und Bächen. Die überaus zahlreichen Eier werden in gewundenen Laichschnüren an Pflanzen oder an die Unterseite von Steinen abgelegt. Die verbreitetste Art in stehenden und fließenden Gewässern ist Gordius aquatius; Gebirgsbäche bevorzugt Parachordodes tolosanus. Auf den Süden beschränkt erscheint die mit Papillen besetzte Gattung Chordodes.

15. **Mermitiden.** Neben einer Reihe in feuchter Erde lebender Arten umfassen die Mermitiden auch Süßwasserbewohner, die in ihrer Jugend hauptsächlich bei gewissen Fliegenlarven der Gattung Chironomus schmarotzen. Geschlechtsreife Tiere trifft man nicht selten spiralig eingerollt auf dem Schlammboden von Altwassern und Seen und zwar bis in die größten Tiefen hinab. Hierher gehören Paramermis aquatilis und P. contorta; in Flüssen lebt Paramermis fluviatilis, während P. arenicola und P. ascaroides bis jetzt nur tief in reinem Sande von Bächen erbeutet wurden.

16. **Oligochaeten.** Die Oligochaeten sind, von ganz vereinzelten marinen Formen abgesehen, auf das Land und das Süßwasser beschränkt. Hier sind sie fast über die ganze Erde verbreitet und in den einzelnen Regionen durch zahlreiche, vielfach durchaus charakteristische Gattungen vertreten. Die Mehrzahl von ihnen lebt im Schlamme und Sande stehender und fließender Gewässer, in der Tiefe der Seen und der Brunnen und bis hinauf zu den Quellen der Hochgebirge; manche halten sich zwischen Pflanzen auf, auch Parasitismus kommt zuweilen vor. Die Haupt-

nahrung besteht in modernden Vegetabilien, organischem Detritus, seltener in mikroskopischen Algen usw. Die Eier werden in oft recht charakteristischen Kokons an Steine, Pflanzen, Holzwerk oder in den Schlamm abgelegt.

Typisch limikole Borstenwürmer sind neben Lumbriculus vor allem die Tubificiden, unter denen Limnodrilus und besonders Tubifex in schlammigen Gräben und Bächen oft sehr auffällige blutrote Massenentfaltungen zeigen. Beide Gattungen steigen auch tief in die Seen hinab und durchsetzen dort mit den mehr benthonischen Formen Tubifex velutinus, Bythonomus lemani, Rhyacodrilus lemani in sehr individuenreichen Beständen weithin den feinen Grundschlick. Der Schlick von Seen und Flüssen beherbergt als einzigen heimischen Vertreter der Familie der Glossoscoleciden Criodrilus lacuum mit eigentümlichen lang schotenförmigen Kokons. Fließendes Wasser bevorzugen Potamothrix, Trichodrilus allobrogum und wohl auch Rhynchelmis limosella. Dunkle Brunnen bewohnen Aeolosoma tenebrarum, Trichodrilus pragensis, Bythonomus Lankasteri sowie der lange Haplotaxis gordioides, der auch im Grundwasser, im Sande von Flüssen, in Gräben und Teichen gefunden wurde. Die Bestände der Wasserpflanzen und Algenrasen sind der Hauptaufenthalt der kleinen durchsichtigen räuberischen Naiden (Nais, Chaetogaster, Aeolosoma), die einen großen Teil des Jahres hindurch sich ungeschlechtlich durch Querteilung vermehren. Schmarotzer sind Chaetogaster limnaei an und in Schnecken der Gattungen Limnaeus, Planorbis, Physa, dann die weitgehend umgebildete Familie der Discodriliden mit der Gattung Branchiobdella, welche auf Panzer und Kiemen des Flußkrebses sich festsaugt.

Neben diesen ständigen Bewohnern des Wassers lebt eine ganze Anzahl von Oligochaeten mehr oder weniger amphibisch in nächster Nähe desselben. Hierher gehören die Enchytraeiden, von denen nur einige Arten der Gattungen Marionia, Lumbricillus und Fridericia eigentlich aquatisch sind, während die Mehrzahl in feuchter Erde ihren Aufenthalt hat. Echte Lumbriciden der Gattungen Eisenia, Eiseniella, Helodrilus finden sich gar nicht selten unter Steinen der Bach- und Flußufer sowie in Moosrasen des Wassers selbst.

Sehr interessante Oligochaeten bergen manche außereuropäische Gewässer. Einen ganz auffallenden Formenreichtum zeigt die sonst recht artenarme Familie der Lumbriculiden im Baikalsee, wo die Gattungen Teleuscolex und Lamprodrilus die phylogenetisch ältesten Vertreter der ganzen Gruppe darstellen dürften; dasselbe gilt unter den Tubificiden von der gleichfalls hier endemischen Gattung Lycodrilus. Von tropischen Oligochaeten ist am merkwürdigsten die Gattung Alma aus der Familie der Glossoscoleciden, die die Größe eines starken Regenwurms erreicht. Sie ist besonders ausgezeichnet durch den Besitz zweier flügelförmiger Anhänge von bandartiger Gestalt, die als Penes fungieren. Die Gattung ist in mehreren Arten über das tropische Afrika verbreitet und dringt in Alma nilotica bis nach Nordägypten vor.

17. **Polychaeten.** Im Meere allenthalben reich entwickelt, gehören Polychaeten im Süßwasser zu den seltensten Erscheinungen. Nereis und Lumbriconereis werden aus Seen und Flüssen der Insel Trinidad, aus dem Palaeotom-See in Mingrelien erwähnt, die Gattung Coabangia von Melania-Gehäusen aus Flüssen Tonkins. Die Sabellide Manayunkia speciosa wurde im Schuylkill-River bei Philadelphia gefunden; im Baikalsee bedecken die Röhren von Dybowskyella baicalensis (Fig. 9), ebenfalls eine Sabellide, in ungeheurer Menge den Schlamm und die Büsche von Potamogeton in 15 bis 30 m Tiefe.



Fig. 9. Süßwasserpolychäte Dybowskyella baicalensis. Nach Nusbaum.

18. **Hirudineen.** Die Hirudineen, durchweg größere bis sehr große Würmer, gehören mit wenigen Ausnahmen dem Süßwasser an.

Als vorherrschende Blutsauger auf andere Tiere angewiesen, treten sie niemals in solchen Mengen, auf wie die schlammfressenden Oligochaeten. Die Nahrung liefern Kalt- und Warmblüter, die meist ausgesaugt, in manchen Fällen auch zerstückelt und verschluckt werden. Die Eier werden in Kokons abgelegt; die Glossosiphoniden zeigen eine Art von Brutpflege, indem die auf einem frühen Entwicklungsstadium ausschlüpfenden Jungen an der Bauchfläche der Mutter angesaugt mit herumgeschleppt werden.

Die Mehrzahl der Hirudineen bevorzugt als Aufenthaltsorte wasserpflanzenreiche Gewässer, wo die Egel meist an der Unterseite von Steinen, an Pflanzen und Tieren festgesaugt sitzen; Hirudo, Haemopis und besonders Piscicola schwimmen auch ganz gut.

Von der Familie der Gnathobdelliden bewohnt Hirudo medicinalis in zahlreichen Farbenvarietäten die Sümpfe des mittleren und südlichen Europa, Nordafrikas und Westasiens. Weit häufiger als der medizinische Blutegel ist der Pferdeegel (Haemopis sanguisuga), der kein Blut saugt, sondern kleine Würmer usw. verschlingt; er geht öfter auch an das Land. Die Länder um das Mittelmeer beherbergen die lästige Limnatis nilotica. Am meisten verbreitet und am wenigsten wählerisch in bezug auf den Aufenthaltsort ist die Gattung Herpobdella (Nephelis), die stehende und fließende, reine und verschmutzte Gewässer bewohnt und in den Alpen über 2000 m hoch emporsteigt. Aus der Familie der Glossosiphoniden (Clepsinen) gehören Glossosiphonia complanata, G. heteroclita zu den gemeinsten Egeln unserer Fauna; sie saugen an Schnecken, seltener an Würmern, während die gallertig weiche Protoclepis tesselata zeitweise auch in der Rachen-

höhle von Schwimmvögeln, besonders Wildenten schmarotzt. Placobdella catenigera saugt in Ost- und Südeuropa an Süßwasserschildkröten; Pl. Raboti, eine anscheinend mehr nordische Form, verbreitet sich von Lappland bis Norddeutschland. Unter den tropischen Formen umfaßt die Gattung Haementaria die größten Hirudineen überhaupt: H. Ghilianii in Südamerika erreicht weit über 20 cm Länge und 10 cm Breite. Ektoparasitisch an Fischen lebt die Familie der Ichthyobdelliden: Piscicola, unser lebhaftester Egel, an Fischen des stehenden und fließenden Wassers, Cystobranchus mehr an denjenigen von Bächen und Flüssen (Salmoniden, Barben). Beide legen sehr hartschalige, bei Cystobranchus noch mit fingerförmigen Fortsätzen versehene kleine Kokons an Steine und Pflanze ab.

Tentaculaten.

19. **Bryozoen.** Die Bryozoen, von Grönland bis Australien über alle Erdteile verbreitet, bewohnen sowohl stehende als auch fließende Gewässer, wo sie in sehr verschiedenartig gestalteten Kolonien Pflanzen, Steine, Holzwerk und Molluskenschalen überziehen. Ihre Hauptentfaltung fällt in unseren Breiten auf die wärmere Jahreszeit; im Hochsommer und Herbst werden auf ungeschlechtlichem Wege charakteristische resistente Dauerkeime Statoblasten gebildet, die den winterlichen Zerfall der Kolonien (in den Tropen die Trockenzeit) überstehen und im Frühling neue Polypide knospen lassen. Ueberwinterung ist bei den Gattungen Lophopus sowie Fredericella beobachtet.

Mit Ausnahme der entoprokten Urnatella gracilis, die in Flüssen Nordamerikas Steine und Muschelschalen besiedelt, gehören alle Süßwasser-Bryozoen zu den Ektoprokten. Am formenreichsten ist die kosmopolitisch verbreitete Gattung Plumatella, deren Kolonien bald hirschgeweihartig verzweigte Röhren, bald massige Klumpen (die frühere Gattung Alcyonella) bilden. Die nahe verwandte Fredericella steigt in den Seen vom Ufer bis etwa 200 m Tiefe hinab, wo ihre Stöckchen oft zu vielen Hunderten dichtgedrängt in dem festen Grundschlick stecken; in den Alpen findet sie sich noch in 2000 m Höhe. Unter den Bryozoen mit Gallerthülle ist am bekanntesten die raupenartig gestreckte Cristatella mucedo, der die Fähigkeit der Ortsbewegung zukommt; seltener ist der erbsen- bis kirschgroße Lophopus. Die Gattung Pectinatella, ursprünglich in Nordamerika entdeckt, dann auch bei Hamburg, Berlin, in der Oder bei Breslau nachgewiesen, stellt mit ihren äußerst wasserreichen Gallertkolonien, die Kopfgröße und ein Kilogramm Gewicht erreichen, die größte Bryozoenform dar. Neben diesen phylaktolaemen Gattungen birgt das Süßwasser auch einige Gymnolaemen. Hierher gehört die gegliederte Paludicella, die keine Statoblasten, sondern birnförmige Winterknospen bildet, weiter die sehr zarte Victorella (mehr im Brackwasser), sowie Pottsiella in Nordamerika.

Bisher nur aus den Tropen bekannt sind die Gattungen Lophopodella (Afrika und Asien), Stephanella (Japan), Arachnoidia (Tanganjikasee). Dazu kommen noch als einzige Süßwasserformen der sonst rein marinen Chilostomen die Flustra-artigen Gattungen Hislopia und Norodonia in Indien, Cambodscha und China. Auch Echinella placoides aus dem Baikalsee dürfte wohl hierher gehören.

Mollusken.

Die Mollusken bilden nach verschiedenen Richtungen hin einen wesentlichen Bestandteil der Süßwasserfauna. Kein anderer Stamm des Tierreichs bietet hier neben so zahlreichen leicht zu sammelnden und leicht zu konservierenden lebenden Arten auch so viele gut erhaltene fossile Reste wie die Muscheln und Schnecken. Die Möglichkeit, die Verbreitung der Mollusken nicht nur im Raume, sondern auch in der Zeit zu überschauen, sichert diesen Tieren eine besondere Bedeutung in allen Fragen, welche die geologische Entwicklung und den Zusammenhang bestimmter Faunengebiete behandeln, mögen diese nun einzelne Stromsysteme oder größere tiergeographische Regionen umfassen.

In folgendem sollen nun die verschiedenen Klassen der Mollusken gesondert behandelt werden. Bei der Ueberfülle des Materials können jeweils nur einzelne Beispiele herangezogen werden.

20. **Gastropoden.** A. Prosobranchier. Die größten Kiemenschnecken und die größten Süßwassergastropoden überhaupt stellen die Ampullarien dar, die völlig auf die Tropen beschränkt sind. Recht bedeutende Dimensionen erreichen auch die lebendig gebärende Paludinen, die bei uns durch wenige Arten (Vivipara vivipara, V. fasciata) vertreten sind. Verwandt mit diesen sind die Gattungen Margarya in Südchina und Tulotoma in Nordamerika, die durch ihre skulpturierten und gekielten Gehäuse sehr auffallend an gewisse im Pliozän von Osteuropa einst in üppiger Formenfülle entwickelten Paludinen erinnern. Afrikanisch sind Cleopatra im Nil und Neothauma im Tanganjikasee. Zahlreicher als die Familie der Paludinen ist bei uns diejenige der Hydrobiiden vertreten. Hierher gehört als eine der häufigsten Schnecken stehender und fließender Gewässer die Gattung Bythinia; eine ausgesprochene Schlickschnecke ist Lithoglyphus, der sich von Osteuropa aus immer mehr nach Westen verbreitet und bereits den Oberrhein erreicht hat. Bewohner von Quellen und Bergbächen in oft eng umschriebenen Verbreitungsgebieten sind die kleinen Bythinellen; eine Art (Bythinella Steinii) lebt in den baltischen Seen. Typische Höhlenschnecken, besonders der Kalkgebirge, treten uns in den zarten blinden Lartetien oder Vitrellen entgegen, welche in ihrer Isolierung zahlreiche charakteristische Lokalformen ausgebildet haben. Südeuropa besitzt die Gattungen Pyrgula und Emmericia, Nordamerika Amnicola und Fluminicola. Auf das Gebiet des Baikalsees beschränkt, hier aber in großer Formenmannigfaltigkeit entwickelt, erscheint neben Benedictia die Gattung Baikalia, die bis 350 m Tiefe hinabgeht. Die Familie der Valvatiden mit der Hauptgattung Valvata ist bei uns durch mehrere Arten vertreten; Valvata alpestris erreicht noch die Tiefenregion der Alpenseen. Cremnoconchus an überrieselten Felsen indischer Gebirge,

Pseudogibbula an Gesteinblöcken des Kongo vertreten die sonst marine Familie der Litoriniden im Süßwasser.

Ausgesprochene Bewohner wärmerer Klimate sind die Melanien. Melania selbst ist in zahlreichen charakteristischen Untergattungen mit einigen hundert Arten in den Tropen weit verbreitet; Melania Holandri findet sich wohl als Relikt der Tertiärzeit in Bächen und Flüssen der Balkanhalbinsel bis nach Steiermark. Die Gattung Melanopsis zeigt ein sehr auffallendes Bild disjunkter Verbreitung: sie bewohnt Neuseeland, Neukaledonien und dann wieder die Mittelmeerregion, von wo aus Melanopsis Esperi und Melanopsis acicularis im Donaugebiet weit nach Norden, die letztere bis Wien vordringen. Verwandte der Melanien sind die Strepomatiden oder Pleuroceriden mit mehreren hundert Formen völlig auf Nordamerika beschränkt, wo in den östlichen Vereinigten Staaten die Schnecken der Gattungen Pleurocera, Goniobasis, Ancylotus, Gyrostomum oft dicht gedrängt die Felsen der Flüsse bedecken. In der Familie der Neritiden umschließt die Gattung Neritina Arten, welche das Salz- und Süßwasser sowie das feste Land bewohnen. Bei uns lebt Neritina fluviatilis in rascher fließenden Gewässern sowie in der Brandungszone der Seen; die Donau hat ihre besonderen Arten (Neritina danubialis, N. transversalis).

Prosobranchier aus sonst marinen Familien birgt der Tanganjikasee: Spekia vertritt die Naticiden, Tanganikia (Fig. 27) die Planaxiden, Paramelania (Fig. 26), Lavigeria und Bythoceras die Purpuriniden, Chytra die Xenophoriden.

B. Pulmonaten. Die Pulmonaten sind eine sehr alte schon im Jura auftretende Gruppe von Süßwasserschnecken und als solche in den Hauptgattungen (Limnaeus, Planorbis, Physa) über die ganze Erde verbreitet. Die größte Artenzahl weisen die Limnaeiden mit den Gattungen Limnaeus und Planorbis auf, die sehr verschiedenen Gewässer von der Ebene bis weit in die Hochgebirge bewohnen; besonders bevorzugt werden pflanzenreiche Teiche, Altwasser sowie Seen, an deren Brandungsufern dickschalige und gedrungene „Seeformen" zur Ausprägung gelangen. Einzelne Limnaeen gehören auch der Tiefenfauna an wie beispielsweise Limnaeus abyssicola, der im Genfersee noch in 260 m Tiefe lebt. Diese dünnschaligen Bodenformen haben die Luftatmung aufgegeben und benutzen ihre Lunge als Kieme. Die verwandte Gattung Amphipeplea ist durch ihre Verbreitung interessant: sie findet sich zerstreut durch Europa, weiter in Australien, den Philippinen und Molukken. Mehr oder weniger sessile, an Steinen und Pflanzen festgesaugte Formen umfassen die Gattungen Ancylus und Acroloxus; die erstere bewohnt hauptsächlich fließende Gewässer und die Ufer größerer Seen (Ancylus fluviatilis), kommt aber auch an überrieselten Felsen vor; letztere bevorzugt ruhiges Wasser (Acroloxus lacustris). In der Familie der Physiden umfaßt die Gattung Aplexa vorwiegend nordische Arten in zirkumpolarer Verbreitung; von der Gattung Physa gewinnt neben Physa fontinalis neuerdings Physa acuta durch Verschleppung von Westen her in Deutschland immer mehr an Boden.

Von außereuropäischen Lungenschnecken mit bemerkenswerter geographischer Verbreitung wären zu erwähnen: Choanomphalus im Baikalsee noch in Tiefen von mehreren hundert Metern, in einer Untergattung (Carinifex) auch in Kalifornien vorkommend. Weiter Bulinus in den Ländern um das Mittelmeer, Afrika, Antillen, Ozeanien, Gundlachia auf den Antillen, Mittelamerika und in Tasmanien. Auf das äußerste Südamerika (Chile, Patagonien) beschränkt ist die Familie der Chiliniden.

C. Opisthobranchier. Die Hinterkiemer galten bis vor kurzem als eine ausschließlich marine Gruppe der Mollusken. Um so auffallender ist das Vorkommen von Ancylodoris baicalensis im Süßwasser des Baikalsees.

21. **Lamellibranchiaten.** Unsere Süßwassermuscheln gehören drei Familien der Lamellibranchiaten an: den Najaden oder Unionen, den Cyreniden und Mytiliden. Die Najaden entfalten in den Hauptgattungen Unio, Margaritana, Anodonta, Pseudanodonta einen kaum zu überblickenden Reichtum an Formen, um so mehr als diese Muscheln auch auf alle Einwirkungen der nächsten Umwelt, wie Stärke der Wasserbewegung, Beschaffenheit des Untergrundes durch entsprechende Veränderungen ihrer Schalengestalt zu reagieren pflegen. Bloße Beschreibungen und Messungen dieser „Reaktionsformen", und seien dieselben noch so minutiös, sind daher nicht immer imstande, die Muscheln jeweils so zu charakterisieren, daß dieselben später auch an anderen Fundorten stets mit Sicherheit wieder identifiziert werden könnten, noch weniger reichen sie aus, um das scheinbare Formenchaos einigermaßen natürlich zu gliedern. Anders wird das Bild jedoch, wenn man die zahllosen Najadenformen — es handelt sich zunächst um diejenigen der Gattung Unio — geographisch nach Flußsystemen sondert. Da zeigt es sich, daß viele unserer Flüsse und selbst Flußstrecken ihrer Najadenfauna ein charakteristisches Gepräge aufdrücken, das oft so zähe bewahrt wird, daß es in zahlreichen Fällen möglich ist aus dem allgemeinen Habitus einer Najadenform direkt auf deren Herkunft zu schließen. Dieser Nachweis eröffnet weite Perspektiven auch für die Geologie, da es nun durchführbar erscheint an der Hand der Verbreitung bestimmter Najadenformen alte jetzt unterbrochene Flußverbindungen zu rekonstruieren, wie dies mit Erfolg bereits für das Stromgebiet des Rheins und der Donau versucht worden ist.

Von den oben genannten Gattungen der heimischen Najaden ist Margaritana margaritifera, die Perlmuschel, auf kühlere kalkarme Gewässer beschränkt; sie findet sich zerstreut in verschiedenen Mittelgebirgen Deutschlands, in der Lüneburger Heide sowie zirkumpolar noch hoch im Norden von Europa, Asien und Amerika. Die kosmopolitische Gattung Unio umfaßt in Europa nördlich der Alpen die Formenkreise von Unio batavus, U. pictorum und U. tumidus. Weitaus am variabelsten unter diesen ist Unio batavus mit sehr zahlreichen Lokalformen; er bewohnt fließende Gewässer — im Rhein unterhalb Konstanz als Unio consentaneus noch in 25 m Tiefe — und steigt

am weitesten in den Gebirgsbächen empor, während U. pictorum und U. tumidus mehr die schlickreichen Gewässer der Niederungen, Flüsse, Altwasser, seltener Seen bevorzugen. Süd- und Westeuropa bis nach Ostfrankreich hin haben Unio litoralis sowie den riesigen dickschaligen U. sinuatus, beide im Diluvium weiter nach Norden und Osten verbreitet; U. sinuatus lebte noch in historischer Zeit im Oberrhein. Im Gebiet des Mittelmeers blühen neben Unio litoralis noch die Formenkreise von U. Requienii, U. Vescoi und U. elongatulus; Margaritana wird hier durch die Gattung Microcondylaea vertreten. Im Gegensatz zu Unio bevorzugt die Gattung Anodonta mehr ruhige schlammige und pflanzenreiche Gewässer, wo die Muscheln oft eine sehr beträchtliche Größe erreichen. Obwohl die Anodonten zahlreiche Standortsvarietäten aufweisen, neigen sie doch anscheinend nur wenig zur Ausprägung geographischer Lokalformen; nur gewisse Angehörige des Formenkreises von Anodonta piscinalis zeigen im Gebiet der unteren und mittleren Donau besondere Eigentümlichkeiten, die sie früher als eigene Gattung Colletopterum erscheinen ließen.

So groß nun auch infolge der intensiveren Durchforschung die Zahl der geographischen Najadenformen in Europa erscheint, so gering ist doch hier die Zahl der Hauptarten oder Formenkreise; auch Afrika besitzt nur relativ wenige Species. Weit größer ist der Reichtum in Süd- und Ostasien. Aber alle Gebiete übertrifft bei weitem Nordamerika: mehr als 530 Arten von Unionen sind aus diesem Lande bis jetzt beschrieben worden und noch immer scheint die Fülle nicht erschöpft zu sein.

Den Tropen eigentümliche Gattungen von Unioniden sind Glabaris, Monocondylaea, Tetraplodon, Castalia in Südamerika, Pliodon, Mutela und Spatha in Afrika (Nil usw.), Pseudodon in Südasien. Verwandt mit den Unioniden sind die durch Ungleichheit ihrer Schalen ausgezeichneten fußlosen Aetherien, die austernartig an Felsen in Flüssen festsitzen. Hierher gehören Aetheria in den Riesenströmen Afrikas und Mulleria in Südamerika.

Die Familie der Cyreniden ist in Europa durch die Gattungen Pisidium und Sphaerium vertreten, meist kleine Muscheln, die im Schlamm und Schlick stehender Gewässer, im Sand von Bächen und Flüssen (Sph. rivicola) oder zwischen Ufersteinen leben. Sie steigen im Gegensatz zu den Najaden weit in die Hochgebirge auf und gehören in einer ganzen Anzahl schwer zu trennender „Arten" zu den charakteristischsten Mitgliedern der Tiefenfauna unserer Seen, wo sie noch in 300 m Tiefe vorkommen. Die Gattung Corbicula, im Diluvium bis England verbreitet, bewohnt jetzt alle Erdteile außer Europa.

Aus der Familie der Mytiliden, die meist marine und Brackwasserformen umfaßt, hat im Laufe des letzten Jahrhunderts Dreyssensia polymorpha von Südrußland her, dem Lauf der Flüsse und Kanäle folgend, einen beträchtlichen Teil Zentral- und Westeuropas erobert. Die erwachsenen Tiere sitzen, oft in großen Gesellschaften, mit ihrem Byssus festgeheftet an Steinen, Holzwerk oder auf anderen Muscheln, während die Larvenstadien frei im Plankton schwärmen. In ähnlicher Weise verankert sich die Gattung Byssanodonta im reißenden Wasser südamerikanischer Ströme.

Crustaceen.

Es gibt kaum eine zweite Gruppe von Süßwassertieren, die eine solche Mannigfaltigkeit morphologischer Gestaltung sowie eine derartige Verschiedenheit der Lebensweise aufzuweisen hätte, wie die Crustaceen. Sie fehlen keinem Lebensbezirke des Süßwassers und spielen vor allem im Plankton der Seen schon durch ihre Massenentfaltung die herrschende Rolle unter allen Wirbellosen.

22. **Phyllopoden.** A. Euphyllopoden. Die Euphyllopoden finden sich nur im Süßwasser oder hochkonzentriertem Salzwasser; dem Meere fehlen sie völlig. Ihr Auftreten ist durchaus an periodische seichte Gewässer gebunden, wo die seltsamen Krebse zeitweise in großer Individuenzahl erscheinen, um dann beim Austrocknen der Pfützen und Lachen manchmal auf viele Jahre hinaus wieder scheinbar völlig zu verschwinden. Die Trockenzeit wird in Dauereiern überstanden, die ihre Entwickelungsfähigkeit jahrzehntelang bewahren können. In einer Reihe von Gattungen über alle Erdteile verbreitet, gliedern sich die Euphyllopoden biolologisch in Kaltwasserformen und in Warmwasserformen: die Dauereier der ersten Gruppe müssen um sich zu entwickeln, ausfrieren, die der letzteren austrocknen. Die psychrophilen Arten bewohnen Schmelzwassertümpel der arktischen Regionen und der Hochgebirge, weiter die Tümpel der Niederungen, welche sich im Frühjahr bei der Schneeschmelze bilden und gegen den Sommer wieder versiegen. Hierher gehören im hohen Norden Polyartemia forcipata (Lappland, Nordsibirien, Grönland), Artemiopsis im nördlichen Sibirien, Polyartemiella im arktischen Nordamerika, Branchinecta paludosa, welche südlich zur Hohen Tatra vordringt, ohne indessen die Alpen zu erreichen, weiter in unseren Gegenden Lepidurus productus, Chirocephalus Grubei, beide besonders in moorigen Tümpeln und Waldgräben. Thermophile Formen sind naturgemäß am zahlreichsten in wärmeren Klimaten, besonders in Steppengebieten vertreten. Bei uns zählen hierher Apus cancriformis, Branchipus Schäfferi, der die Hauptnahrung von Apus bildet, weiter die Gattungen Streptocephalus, Cyzicus, Leptestheria, die im Sommer trübe lehmige Regenwassertümpel auf offenem Gelände bevölkern. Ueberschwemmte Wiesen usw. mit klarem Wasser bevorzugen Limnadia lenticularis und Lynceus brachiurus. Tropisch sind neben zahlreichen weiteren Arten der eben genannten thermophilen Gattungen die Gattungen Eubranchinella (Afrika), Dendrocephalus (Amerika); auf Nordamerika beschränkt erscheinen Thamnocephalus, Eubranchipus.

B. Cladoceren. Die Cladoceren oder Daphniden bevölkern in beträchtlicher Artenzahl fast alle stehenden Gewässer, vom kleinsten Tümpel bis zum größten See. Ihre oft ungeheure Individuenzahl verdanken sie ihrer lebhaften parthenogenetischen Vermehrung durch Subitan-

eier, welche im Brutraum der Weibchen ihre Entwickelung durchmachen; durch Befruchtung entstehen Dauereier, welche meist in sogenannten Ephippien, Umbildungen der Rückenhaut der Schale, abgelegt werden und so leicht verschleppt werden können. Das Auftreten von Männchen und die Bildung der Dauereier erfolgt bei den meisten Arten im Laufe eines Jahres nur einmal, gewöhnlich im Herbst; man spricht hier von monozyklischen Formen im Gegensatz zu den dizyklischen oder polyzyklischen, bei denen sich die Geschlechtsperioden und die Dauereibildung zwei oder mehrere Male wiederholen.

Periodische Tümpel werden im Sommer von der Gattung Moina bewohnt, die ausgesprochen polyzyklisch ist; Moina micrura scheint perennierende Gewässer zu bevorzugen. Die Hauptmasse der Cladoceren entfaltet sich in vegetationsreichen Teichen, Altwassern und Seen. Zwischen den Wasserpflanzen tummeln sich in zahlreichen Arten vor allem die Chydoriden mit den Gattungen Eurycercus, Acroperus, Camptocercus Alona, Pleuroxus, Chydorus, alle am reichsten im Sommer entwickelt. Perennierende Schlamm- und Schlickbewohner sind Monospilus, Iliocryptus, Lathonura, Arten von Macrothrix, Leydigia. Sphagnophil sind Holopedium, Streblocerus, Drepanothrix; auch Polyphemus ist in Moortümpeln am regelmäßigsten zu finden. Das freie Wasser nahrungsreicher Teiche bevölkern oft in Massenentfaltungen Daphne (Daphne pulex, D. magna), Ceriodaphnia, Scapholeberis; Sida, die sich gern an Pflanzen festheftet, liebt reineres Wasser. Wo größere freie Wasserflächen sich dehnen, stellen sich auch die typischen glasartig durchsichtigen Planktonformen ein. Hierher gehören neben Diaphanosoma vor allem Daphne longispina-cucullata, mit sehr zahlreichen lokalen und temporalen Variationen, weiter Bosmina ebenfalls äußerst leicht zur Bildung charakteristischer Lokalformen neigend. Die weitgehendsten Anpassungen an die planktonische Lebensweise zeigen Leptodora (Fig. 15) und Bythotrephes (Fig. 14), beides Sommerformen und ausgesprochen räuberische Tiere im Gegensatz zu den übrigen Daphniden, welche sich vorherrschend von kleinsten Algen und Flagellaten, organischem Detritus usw. ernähren.

Was die geographische Verbreitung der Cladoceren anbelangt, so sind zahlreiche Gattungen wie beispielsweise Ceriodaphnia, Alona, Pleuroxus, Chydorus kosmopolitisch. Nordisch scheinen Limnosida, Ophryoxus, Latona, und ihrem Ursprung nach auch die oben genannten sphagnophilen Formen zu sein. Bewohner tropischer Gebiete sind unter anderen die Gattungen Euryalona und Dadaya in Asien und Südamerika, Guernella in Afrika und Asien, Iheringula und Leydigopsis in Südamerika.

23. **Ostracoden.** Die schwere kalkreiche Schale stempelt die Ostracoden zu vorherrschenden Bodenbewohnern; Notodromas schwimmt auch lebhaft unter der Oberfläche des Wassers umher. Ihre Hauptaufenthaltsorte sind stehende Gewässer, kleine ephemere Pfützen in überschwemmten Äckern und Wiesen, lauberfüllte Tümpel in Wäldern, Teiche und Seen. Hier leben die Vertreter der eigentlichen Cypriden, die artenreichen Gattungen Candona und Cypris, Iliocypris, Cypridopsis, meist im Bodenschlamm kriechend, seltener zwischen den Pflanzen kletternd. Die Tiefen der Seen mit ihren vegetationsfreien Schlickflächen beleben in weiter Verbreitung die sonst vorherrschend marinen Cytheriden (Cytheridea, Leucocythere, Limnocythere). Rheophil sind Prionocypris serrata und Paracypridopsis Zschokkei, welche in Moospolstern rasch fließender Gebirgsbäche klettern und Hand in Hand damit eine Reduktion der Schwimmborsten der Antennen erfahren haben. Die Nahrung der Ostracoden besteht in Pflanzenresten, organischem Detritus usw. Biologisch sind einige Arten dadurch von Interesse, daß sie sich scheinbar fast unbegrenzt rein parthenogenetisch fortpflanzen können.

24. **Copepoden.** Die Copepoden sind in unseren Gewässern durch die Familien der Cyclopiden, Centropagiden und Harpactiden vertreten. Die Cyclopiden umfassen in der Gattung Cyclops eine ganze Reihe kosmopolitisch verbreiteter Arten. Das auffallendste Beispiel nach dieser Richtung hin dürfte Cyclops fimbriatus darstellen, der von Grönland bis Südamerika, Afrika und Südasien die allerverschiedensten Gewässer bewohnt: in Gräben, Teichen, Seen, in kleinen Pfützen am Grunde von Bergwerken, in konzentrierten mineralischen Wässern, in den Alpen über 2700 m Höhe, in Seen in 200 m Tiefe — überall ist dieser Ubiquist nachgewiesen worden. Auch sonst besiedeln die Cyclopiden seichte und tiefe, periodische und perennierende Gewässer und stellen auch zahlreiche Vertreter zum Plankton. Manche Arten kommen perennierend das ganze Jahr hindurch vor, andere sind stenotherme Kaltwasserformen wie Cyclops strenuus, C. bisetosus, oder Warmwasserformen wie Cyclops Leuckarti und C. oithonoides. Ungünstige Temperaturverhältnisse, zeitweiliges Austrocknen der Gewässer können in Ruhezuständen überdauert werden, indem die Krebse sich und ihre Eiballen mit einer Gallerthülle umgeben. Eigentliche Dauereier fehlen.

Sind also die Cyclopiden durch ihre weitgehende Anpassungsfähigkeit an die verschiedensten Existenzbedingungen für zoogeographische Fragen nur wenig zu verwerten, so erscheinen die Centropagiden um so geeigneter hierfür. Zwar ist die Hauptgattung Diaptomus als solche fast kosmopolitisch, aber die Mehrzahl ihrer Arten (über 120) zeigt doch bestimmte Verbreitungsgebiete und vielfach ausgesprochene Vorliebe für bestimmte Gewässertypen. So ist, um nur einige Beispiele anzuführen, Diaptomus glacialis rein arktisch, während D. denticornis und D. bacillifer außer dem Norden auch kühle subalpine und Hochgebirgseen des gemäßigten Europa und Asien bewohnen. Osteuropäisch sind Diaptomus pectinicornis und D. Zachariasi, mediterran D. Alluaudi, D. Chevreuxi und D. ingens, der bis 5,5 mm Länge erreicht. Sehr reich an Diaptomus-Arten ist Nordamerika, dessen 34 Species alle endemisch zu sein scheinen. Recht beträchtlich und immer noch in Zunahme begriffen ist die Zahl der rein tropischen Formen. Im Plankton unserer Gewässer ist am häufigsten Diaptomus gracilis sowie D. graciloides, während der

wie so viele Diaptomiden durch Carotin orangerot gefärbte D. castor auch kleinere Gewässer bewohnt. Im Gegensatz zu den Cyclopiden sind bei den Diaptomiden echte Dauereier beobachtet worden.

Weitere Gattungen der Centropagiden sind Heterocope in kühlen Gewässern des Nordens sowie des Alpengebiets, als Glazialrelikt auch in Seen und großen Teichen Süd- und Mitteldeutschlands; Eurytemora in nordischen Seen sowie im Mündungsgebiet der Flüsse, von wo Eurytemora velox bis zum Mittelrhein vordringt; Limnocalanus im Norden von Europa, Asien und Nordamerika mit Limnocalanus macrurus als Relikt in schwedischen, finischen und kanadischen Seen. Eine ganz disjunkte Verbreitung besitzt die Gattung Epischura: vier Arten leben in Nordamerika, eine weitere im Baikalsee. Fast durchaus auf die südliche Hemisphäre beschränkt sind die Gattungen Boeckella, Pseudoboeckella und Parabroteas, von denen Pseudoboeckella Entzii selbst in das eisige Wasser der Antarktis (Louis-Philipp-Land) vorgedrungen ist.

Während die Cyclopiden und Centropagiden fast durchweg freischwimmende Tiere aufweisen, umfassen die Harpactiden vorherrschend kriechende Formen, die im Schlamm von Kleingewässern, in Moosrasen von Waldsümpfen, seltener auch in Seen und Bächen ein sehr verborgenes Dasein führen. Einzelne Arten leben auch halb terrestrisch an nur ganz dünn überrieselten oder nur zeitweilig benetzten Lokalitäten wie eine Canthocamptus-Art auf moderndem Grubenholz in Bergwerken, das durch Tropfwasser feucht erhalten wurde oder Moraria muscicola in Moospolstern an Felsen. Ziemlich zahlreich sind unter den Harpactiden Kaltwasserformen vertreten. Zu ihnen gehört eine der häufigsten Arten Canthocamptus staphylinus, dessen Hauptfortpflanzungszeit auf den Winter und Vorfrühling fällt, weiter C. microstaphylinus, der die wärmere Jahreszeit in eigentümlichen pillenartigen Schlammcysten am Grunde der Seen überdauert (Fig. 7). Die Gattung Laophonte lebt im Süß- und Brackwasser, Iliophilus hauptsächlich in letzterem.

Neben den freilebenden Copepoden gibt es auch zahlreiche parasitische, welche meist an den Kiemen, seltener an den Flossen und der Haut von Fischen schmarotzen und hier oft auf ganz bestimmte Gattungen beschränkt sind. Manche dieser Ektoparasiten haben die allgemeine Copepodengestalt noch ziemlich bewahrt, wie die Gattung Ergasilus die ab und zu auch frei gefunden wird; bei anderen hat der Körper im Gefolge der schmarotzenden Lebensweise jegliche Gliederung verloren und seltsame wurmartige Gestalt angenommen, wie bei Lernaecocera und Basanistes. Die für die Copepoden charakteristischen beiden Eiersäckchen gehen indessen auch in den extremsten Fällen nie verloren, ebensowenig das freischwimmende Jugendstadium des Nauplius.

Als Vertreter der branchiuren Copepoden beherbergen unsere Gewässer die Gattung Argulus, welche hauptsächlich an Fischen, selten auch an Kaulquappen schmarotzt, zeitweise auch frei umherschwimmt. Die Eier werden dichtgedrängt in riemenartigen Streifen an Pflanzen und Steine abgelegt. Am reichsten an Arguliden ist Nordamerika; bei uns kommen nur drei Arten vor, unter denen Argulus foliaceus die bekannteste sein dürfte. Auf das tropische Afrika und Amerika beschränkt ist die Gattung Dolops.

25. **Isopoden.** Die Isopoden sind im Süßwasser weit schwächer vertreten als im Meere oder auf dem festen Lande. Bei uns kommt eigentlich nur die Gattung Asellus in Betracht, von der A. aquaticus zu den gemeinsten Krebsen schlammiger Gewässer gehört, während der blinde Asellus cavaticus Brunnen und Höhlen bewohnt und als A. cavaticus Foreli bis 300 m in die Tiefe der Seen hinabgeht. Nicht ganz unbeträchtlich ist dagegen die Zahl der Asseln, welche aus dem Meere mehr oder weniger weit in das Süßwasser eingedrungen sind. Eines der bekanntesten Beispiele ist Idothea entomon, welche als Relikt des Yoldia-Meeres in den großen Seen Schwedens sowie im Ladogasee lebt; in den Pontinischen Sümpfen findet sich Sphaeroma fossarum. Parasitische Isopoden sonst mariner Gattungen werden von ihren wandernden Wirten weit in Binnengewässer mitgeführt. Hierher gehört Bopyrus adscendens, der in der Kiemenhöhle von Palaemon in Gebirgsbächen der Philippinen gefunden wurde, weiter Cymothoa amurensis an Fischen des Amur, Aega an solchen der Tropen. Bewohner von Höhlengewässern sind unter den Asseln Monolistra in Höhlen Krains, Caecidotea in Nordamerika, Cruregens in Neuseeland, alle blind. Auf die südliche Hemisphäre beschränkt ist die amphipodenähnliche Familie der Phreatoicidae, von welcher die Gattungen Phreatoicus und Phreatoicopsis kühle Bergwasser und Brunnen von Südaustralien und Neuseeland bevölkern.

26. **Amphipoden.** Die Amphipoden des Süßwassers gehören mit verschwindenden Ausnahmen zu den Familien der Gammariden, Talitriden und Haustoriiden. Weitaus am zahlreichsten sind unter diesen die Gammariden. Sie bevorzugen kühle und klare Gewässer, Bäche, Flüsse, Seen mit stärkerem Wellenschlag, meist an der Unterseite von Steinen; im freien Wasser des Baikalsees schwimmt der durchsichtige Macrohectopus (Constantia), welcher hier den Hauptbestandteil des Planktons bis in große Tiefen hinab bildet. Die bekanntesten Vertreter der Gammariden sind in unseren Gewässern Carinogammarus Roeselii und Gammarus pulex; der letztere ist der gemeinste Flohkrebs in Bächen und Flüssen und geht in Seen von dem Brandungsufer bis in 100 m Tiefe. Dazu kommen noch einige Gattungen von beschränkterer Verbreitung. Eine mehr östliche Form scheint Synurella (Goplana) zu sein, die westlich von Berlin bis jetzt noch nicht gefunden wurde. Dunkeltiere in Höhlengewässern, Brunnen und am Grunde von Seen sind Niphargus, Boruta in Brunnen der Tatra, weiter die Gattungen Bathyonyx und Crangonyx.

Eine Gammaridenfauna von fast verwirrender Reichhaltigkeit birgt der Baikalsee in seiner Tiefe: an 300 Arten werden aus diesem gewaltigen Wasserbecken angegeben. Vertreten sind hauptsächlich die meist mit Dornen bewehrten Gattungen Carinogammarus, Echinogammarus, He-

terogammarus, dann Pallasea, unter ihnen Riesenformen von 7 bis 8 cm Länge; Ommatogammarus wurde noch in 1300 m Tiefe erbeutet. Die Gattung Pallasea gehört nicht nur dem Baikal an: Pallasea quadrispinosa (Fig. 21) bewohnt die skandinavischen und baltischen Seen und ist hier auch für Norddeutschland nachgewiesen worden.

Mehr noch als bei den Isopoden sehen wir bei den Amphipoden eine ganze Anzahl von Gattungen gleichzeitig im Meere und im Süßwasser vertreten. Hierher gehören Gammaracanthus lacustris in Seen Skandinaviens und Rußlands, dann als einzigen Vertreter der Familie der Haustoriiden Pontoporeia affinis, die ihre Aufenthaltsorte mit Gammaracanthus teilt, außerdem auch in Seen Norddeutschlands und Nordamerikas vorkommt (Fig. 20.) Aus der Familie der Corophiiden ist Corophium devium neuerdings im Müggelsee bei Berlin nachgewiesen worden. Unter den sonst marinen Talitriden steigt Orchestes Chevreuxi in die Kraterseen der Azoren und Bergbäche der Kanarischen Inseln empor; Orchestes gamarellus wird auch für Quellen hoch am Cyprischen Olymp angegeben. Das Vorkommen einer Caprellide im Genfer See bedarf noch weiterer Bestätigung. Süßwasser-Amphipoden der südlichen Hemisphäre sind Hyalella, besonders reich im Titikakasee entwickelt, dann die Gattungen Neoniphargus, Chiltonia und Paracalliope in Tasmanien und Neuseeland.

27. **Schizopoden.** Die Schizopoden haben nur wenige Vertreter im Süßwasser. Am verbreitetsten dürfte die der arktischen Mysis oculata nahestehende Mysis relicta sein, welche in Seen Rußlands, Norddeutschlands und Skandinaviens, weiter in Irland und Nordamerika vorkommt (Fig. 19). Auf Australien beschränkt sind die Gattungen Anaspides, Paranaspides und Koonunga, welche dort kühle und klare Gebirgswasser bewohnen.

28. **Dekapoden.** Unter den Dekapoden stellen die Familien der Astaciden und Parastaciden typische Süßwasserkrebse dar. Erstere gehören den gemäßigten Zonen der nördlichen, letztere denen der südlichen Erdhälfte an. Die Gattung Astacus (Potamobius) ist bei uns durch drei Arten vertreten, deren Bestand indessen durch die seit etwa drei Jahrzehnten herrschende Krebspest vielerorts so gut wie vernichtet ist: Astacus nobilis in Bächen, Flüssen und Seen, A. torrentium in nahrungsarmen Gebirgsbächen, A. pallipes eine südliche Form, die bis in das Elsaß vordringt. In Osteuropa kommt noch Astacus leptodactylus hinzu. Außer in Europa und Sibirien findet sich die Gattung Astacus auch in Nordamerika, aber nur in den dem Stillen Ozean tributären Gewässern; den ganzen Osten des Erdteils beherrscht die überaus artenreiche Gattung Cambarus, welche in Japan und Ostasien durch die Parallelform Cambaroides ersetzt wird. Unter den Parastaciden erreicht die Gattung Astacopsis in kleinen fließenden Gewässern Tasmaniens Hummergröße und ein Gewicht von 8 bis 9 Pfund. Neuseeland birgt Paranephrops, Südamerika Parastacus, Madagaskar Astacoides; Afrika besitzt keine Astaciden.

In den Tropen werden die Astaciden bis zu einem gewissen Grade durch die Atyiden ersetzt. Von ihnen bewohnen Atya Westafrika, Westindien und Ozeanien, Caridina Ostindien und Afrika, wo Caridina Wyckii in dem Süßwasserbecken des Viktoria Nyanza die vollständige Metamorphose der Dekapoden mit freischwimmenden Larvenstadien beibehalten hat, Atyephyra die mediterrane Region. Von den Palaemoniden erscheint Palaemon häufig in tropischen Gewässern; Palaemonetes bewohnt im nördlichen Europa das Brackwasser, in Südeuropa dagegen das Süßwasser und findet sich auch in Nordamerika.

Von den Brachyuren lebt die Familie der Telphusiden (Potamiden) ausschließlich in süßen Gewässern der Tropen und Subtropen. Telphusa (Potamon) verbreitet sich in zahlreichen Arten über Süd- und Ostasien, Australien, ganz Afrika und dringt in Südeuropa bis Mittelitalien vor. Tropisch amerikanisch ist Potamocarinus.

29. **Tardigraden.** Die Mehrzahl der Tardigraden bewohnt Moospolster und Flechtenkrusten an Felsen und Bäumen, also Oertlichkeiten, die nur zeitweise vom Wasser benetzt werden. Die Trockenzeiten werden in einem lethargischen Zustande überdauert, der die Tiere den weitgehendsten Temperaturextremen trotzen läßt; ähnliche Resistenz zeigen auch die vielfach skulpturierten oder mit einer Gallerthülle umgebenen Eier. Dieser Umstand erklärt die weite Verbreitung der Tardigraden, von denen eine ganze Anzahl identischer Arten in der Arktis und Antarktis nachgewiesen wurden. Neben diesen Moosformen gibt es auch einige wenige Bewohner perennierender Gewässer. Zu diesen gehört vor allem Macrobiotus macronyx, dann M. lacustris, M. dispar, von denen der erstere namentlich in Frühjahr in Diatomeenrasen und Oscillarienfilzen auftritt und bei steigender Temperatur des Wassers eigenartige Cysten bildet. Macrobiotus Oberhäuseri findet sich besonders in Regenpfützen. Andere Arten der Gattungen Macrobiotus, Echiniscus, Milnesium, die in Seen, Moortümpeln, Bächen gefunden wurden, dürften ihre eigentliche Heimat in den Moospolstern der Ufer haben; Milnesium tardigradum steigt von hier auch in ziemlich beträchtliche Tiefen der Seen hinab.

Arachnoiden.

30. **Araneiden.** Die einzige heimische wirkliche Wasserspinne ist Argyroneta aquatica, die pflanzenreiche Gewässer in Europa und im gemäßigten Asien bewohnt. Von den zahlreichen Spinnen des Ufers gehen Pirata und Dolomedes öfter auf und selbst unter das Wasser.

31. **Hydracarinen.** Die Hydracarinen bewohnen stehende und fließende Gewässer und zwar jeweils in besonderen charakteristischen Gattungen. Limnophil in Gräben, Teichen, Seen, meist zwischen Pflanzen, zeitweise auch freischwimmend, leben in zahlreichen oft bunt und grell gefärbten Arten die Gattungen Hydrachna, Eylais, Piona, Arrhenurus; limikol ist die träge Limnochares. Als Nahrung dienen kleine Crustaceen usw.; die Eier werden in öfters recht ansehnlichen kuchenartigen Massen an Pflanzen, Holzwerk und Steinen abgelegt. Tiefenformen, die in den Seen bis 300 m hinabsteigen,

sind vor allem Lebertia tau-insignata, Lebertia rufipes sowie Hygrobates albinus. In Muscheln, besonders an den Kiemen derselben schmarotzt die Gattung Unionicola (Atax) in mehreren Arten. Der Gegensatz zu diesen limnophilen, meist wärmere Gewässer bevorzugenden und anscheinend kosmopolitisch verbreiteten Gattungen bilden die rheophilen Hydracariden, als deren typische Vertreter die Gattungen Sperchon, Torrenticola, Aturus, Feltria gelten können, alle kleine Formen mit reduzierten Schwimmborsten. Ihr Aufenthalt sind hauptsächlich die raschfließenden kühlen Gebirgsbäche, seltener die Flüsse der Ebenen, wo die mit starken Fußkrallen bewehrten Milben zwischen den Moos- und Algenrasen an Steinen klettern.

Aus der Familie der Oribatinen ist die braunrote Notaspis lacustris namentlich in Sphagnumtümpeln nicht selten. Das Vorkommen von Halacariden im Süßwasser ist durch den Fund von Halacarus alpinus in Skandinavien sichergestellt; weitere Vertreter dürften vielleicht auch in den subalpinen Seen vorkommen.

Insekten.

Die Insektenfauna des Süßwassers ist überaus reich und vielgestaltig. Zu einer nicht geringen Zahl ständiger Wasserbewohner gesellt sich hier auch ein Heer amphibiotischer Insekten, welche den größten Teil ihres Lebens als Nymphen oder Larven im Wasser zubringen und nur vergleichsweise kurze Zeit — bisweilen nur einige Stunden — als ausgebildete Tiere dem Lande und der Luft angehören, um da der Fortpflanzung obzuliegen. Diese engen Wechselbeziehungen zwischen Land- und Wasserleben sichern diesen Insekten eine gewisse Sonderstellung insofern, als die Zusammensetzung ihres Artbestandes in einem Gewässer weit mehr auch den physischen und biologischen Charakter des jeweils angrenzenden Landes widerspiegelt als bei irgendeiner anderen Gruppe wirbelloser Wasserorganismen. Das gilt nicht nur für kleinere Gebiete, wie beispielsweise bestimmte Flußstrecken, sondern auch für größere Regionen.

32. **Collembola.** Auf dem Spiegel kleiner mit Lemna usw. bewachsener Teiche, auf Pfützen und Lachen, am Ufer von Bächen, Teichen und Seen sind Poduriden der Gattungen Podura, Isotoma, Sminthurides eine gewöhnliche Erscheinung. Die oft in beträchtlicher Individuenzahl vorhandenen Tierchen schnellen bei jeder Beunruhigung mit Hilfe einer Springgabel nach allen Richtungen hin auseinander; sie sollen zeitweise auch unter das Wasser gehen können. Den schmelzenden Schnee bewohnt Degeeria nivalis wie Desoria glacialis Schneefelder und Gletscher der Hochalpen.

33. **Orthopteren.** Die eigentlichen Orthopteren, die Heuschrecken, Grillen und Schaben sind ausgesprochene Landtiere und oft Bewohner der allertrockensten Gebiete. Um so bemerkenswerter ist es, daß in den Tropen vereinzelte Formen eine mehr oder weniger aquatische Lebensweise führen. Ein indischer Acridier aus der Familie der Tettigiden Scelimena geht in das Wasser und soll sich hauptsächlich von submersen Pflanzen nähren; die Phasmide Prisopus verbirgt sich unter überfluteten Steinen der Gebirgsbäche Brasiliens. Von Blattiden lebt in Indien die Larve einer Epilampra unter Steinen fließender Gewässer und kommt nur zum Atmen an die Oberfläche.

34. **Plecopteren.** Die Plecopteren oder Perliden sind in ihrer Mehrzahl ziemlich unscheinbare düster gefärbte Insekten, welche meist träge an Büschen, Bäumen und Steinen in der Nähe von Bächen und Flüssen sitzen; die großen Perla-Arten fliegen im Sonnenschein gern schmetterlingsartig umher. Bei mehreren Gattungen sind die Flügel der Männchen stark reduziert. Auffallend ist die Unempfindlichkeit vieler dieser Tiere gegen niedere Temperaturen: Taeniopteryx trifasciata und Nephelopteryx nebulosa erscheinen bei uns bereits im Februar und März, oft wenn die Gewässer noch teilweise mit Eis bedeckt sind, und Leuctra Klapalekii dauert vom September bis tief in den Dezember aus. Die Hauptflugzeit der meisten Arten fällt in den Niederungen auf April und Mai — daher der Name Afterfrühlingsfliegen —, in den höheren Gebirgen auf Juli bis September. Die Weibchen tragen die Eier zu Häufchen geballt am Hinterende des Abdomens mit herum und setzen dieselben in fließende Gewässer ab. Die Larven, kenntlich durch den Besitz von zwei Schwanzfäden, leben unter Steinen, zwischen Moos und angeschwemmtem Laub, wo sie den Ephemeridenlarven nachstellen; sie atmen durch Tracheenkiemen, die meist am Thorax und Abdomen, bei Nephelopteryx nebulosa dagegen an den Hüften der Beine entspringen; in einer Reihe von Fällen persistieren diese Kiemen noch bei der Imago, wie es am auffälligsten die sibirische Gattung Pteronarcis zeigt.

Die Plecopteren sind über die ganze Erde verbreitet. Sie gehen weit nach Norden und scheinen ihren größten Artenreichtum in Gebirgsbächen zu entfalten. In den Hochalpen sind die Gattungen Dictyopteryx, Leuctra, Nemura noch durch eine Reihe charakteristischer Arten vertreten.

35. **Ephemeriden.** Die Ephemeriden sind in ihrer überwiegenden Mehrzahl an fließende Gewässer gebunden, wo einige Gattungen in Flüssen der Niederungen öfter eine ungeheure Massenentfaltung zeigen: zu Millionen entsteigen in warmen Hochsommernächten die Scharen von Palingenia und Polymitarcys den Fluten, um nach kurzem wirbelnden Hochzeitsfluge und nach Ablage der Eier wieder abzusterben. Etwas länger leben die Angehörigen der Gattung Ephemera, welche tagüber meist in Buschwerk und Gras verborgen sitzen, beim Eintritt der Dämmerung in langsamem Fluge auf und ab schweben. Nahrung wird von den ausgebildeten Eintagsfliegen nicht aufgenommen: die Mundwerkzeuge sind verkümmert und der Darm ist mit Luft gefüllt. Die Eier werden von den Weibchen bald ohne weiteres in Klümpchen dem Wasser anvertraut, bald nacheinander in kleineren Partien ausgesät; Baetis steigt in das Wasser hinab und legt dort die Eier an die Unterseite von Steinen. Vivipar ist Cloeon dipterum. Die Nymphen, fast durchweg mit drei Schwanzborsten, führen eine etwas verschiedene Lebensweise. Diejenigen von Ephemera und Polymitarcys graben Gänge im Sande und Schlick von Flüssen und Seen, die von Cloeon schwimmen zwischen Pflanzen in stehenden Gewässern. Rheophil an der Unter-

seite von Steinen, besonders in Gebirgsbächen, leben die stark abgeflachten breitköpfigen Nymphen von Baetis, Ecdyurus, Epeorus; Oligoneuria scheint auf größere Flüsse beschränkt. Die weitgehendste Anpassung an das Leben in stark strömendem Wasser zeigt die Gattung Prosopistoma, die in Europa, Madagaskar und Westafrika gefunden wird. Hier ist der Körper sehr stark verkürzt und schildförmig gestaltet; die Kiemen liegen unter dem gewölbten Rückenschild versteckt in einer besonderen Atemkammer, in welche das Wasser durch zwei laterale Oeffnungen einströmt und durch eine dorsale Oeffnung austritt.

Die bei uns heimischen Gattungen der Ephemeriden verbreiten sich über den größten Teil der paläarktischen und nearktischen Region, doch sind die nordamerikanischen Arten verschieden von den europäischen. Ameletes, ursprünglich nur aus Amerika bekannt, ist später auch in Europa nachgewiesen worden (Ameletes inopinatus in Vogesen, Schwarzwald, Tatra). Mehr südeuropäisch ist Oligoneuria rhenana welche längs des Rheins weiter nach Norden dringt; eine zweite Art der Gattung bewohnt Brasilien. Kosmopolitisch dürfte die artenreichste Gattung Baetis, wohl auch Cloeon sein. Die Tropen haben eine Anzahl nur ihnen zukommender Gattungen. Auf Neuseeland beschränkt ist Oniscigaster Wakefieldi, welche durch ihren rundlich verbreiterten Hinterleib mit seitlichen Fortsätzen eine der seltsamsten Ephemeriden darstellt.

36. **Odonaten.** Im Gegensatz zu den Plecopteren und Ephemeriden umfassen die Odonaten oder Libellen meist größere bis sehr große, vielfach lebhaft gefärbte Insekten von oft erstaunlicher Flugkraft. Während die zarten Agrioniden und Calopterygiden mit flatternden Flügelschlägen am Ufer der Gewässer auf und ab schweben, schwirren die kräftigen Libelluliden und besonders die Aeschniden bei Sonnenschein in reißendem Fluge über Wasserflächen und Sümpfe dahin, unermüdlich nach Beute spähend, die in den verschiedensten kleinen Insekten besteht. Wiederholt sind große stundenweit sich dehnende Wanderflüge von Libellen — meist solchen der Gattung Libellula — beobachtet worden, wo Tausende und Abertausende von Tieren nach einer bestimmten Richtung zogen. Heiße Sommer lassen bisweilen Einzelwanderer aus fernen Gebieten bei uns erscheinen: so ist die Wüstenform Hemianax ephippiger, die ihre eigentliche Heimat in Nordafrika, Kleinasien und Indien besitzt, schon in Belgien sowie in der Schweiz erbeutet worden. Im einzelnen zeigen die verschiedenen Libellenarten oft eine deutliche Bevorzugung bestimmter Gewässertypen: die schlickreichen offenen Altwasser und Seen der Ebene bergen eine andere Fauna als die verwachsenen Sümpfe und Wiesenmoore, Hochmoore und Gebirgswasser haben ihre eigenen Charakterformen. An Bergbächen fliegt Cordulegaster, an Bächen und Flüssen Calopteryx, Platycnemis sowie die Mehrzahl der Gomphusarten; kalkreiche Gewässer liebt Agrion Lindeni. Die Sphagnummoore und vertorften Seebecken der Gebirge umspielen Agrion hastulatum, Somatochlora arctica, Cordulia alpestris, Leucorhinia dubia; über Seggenfluren der Niederungsmoore flattert unsere kleinste Libelle Nehallenia speciosa. Offene Gewässer, größere Teiche, Altwasser und Seen sind das Hauptfluggebiet der Gattungen Orthetrum, Sympetrum, Epitheca, Cordulia aenea sowie zahlreicher Arten der Gattungen Libellula und Aeschna. Weit vom Wasser findet sich oft Lestes fusca, die einzige Libelle, die bei uns als Imago überwintert.

Die Eier der Libellen werden von den Weibchen bald einfach in das Wasser abgelegt, bald mit Hilfe eines Legebohrers in Pflanzen eingesenkt, wobei Lestes sponsa paarweise untertaucht; bei Epitheca quillt die die Eier umgebende Gallerte sehr stark auf und bildet mehrere Dezimeter lange Laichschnüre. Lestes viridis legt ihre Eier außerhalb des Wassers in Weidenzweige. Die Libellen-Nymphen sind äußerst räuberische Tiere, welche ihre Beute mit Hilfe der zu einer Fangzange umgebildeten Unterlippe, der sogenannten Maske, ergreifen. Sie leben zwischen den Pflanzen am Grunde der Gewässer, diejenigen von Epitheca und Gomphus oft ganz im Schlamm verborgen; bisweilen nehmen sie mit minimalen Wassermengen vorlieb, wie ihr Vorkommen in den mit Regenwasser erfüllten Blattachseln tropischer Bromeliaceen hoch oben in den Baumkronen oder zwischen den Blättern bodenständiger Liliaceen auf den Sandwichinseln beweist. Die Atmung erfolgt bei den Anisopteren (Libellula, Aeschna) durch Rektalkiemen, bei den Zygopteren (Agrion, Calopteryx) durch drei blattförmige Tracheenkiemen am Hinterende; bei der südasiatischen Gattung Euphaea kommen hierzu noch laterale Kiemen.

Unsere heimische Libellenfauna ist verhältnismäßig arm. Sie besteht aus einem Stamm weit verbreiteter paläarktischer Arten mit einem Einschlag arktisch-alpiner Elemente in Gebirgen und Hochmooren sowie einer Anzahl mediterraner Einstrahlungen von Südwesten und Südosten her. Nordischer Herkunft und wohl Glazialrelikte sind in Deutschland die oben genannten Torfmoor-Libellen sowie Agrion armatum der norddeutschen Moore; aus dem Süden stammen Sympetrum Fonscolombei, Sympetrum meridionale, Gomphus pulchellus, G. simillimus, Agrion Lindeni, Pyrrhosoma tenellum, Erythromma viridulum. Weit besser mit Libellen bedacht ist Nordamerika, am reichsten an Gattungen und Arten sind die Tropen, vor allem Südamerika und Ostindien. Von unseren heimischen Gattungen verbreiten sich Aeschna, Anax, Lestes, Ischnura über die ganze Welt; Sympetrum fehlt nur Australien, Agrion (Coenagrion) nur der indisch-orientalischen Region; Orthetrum bewohnt die ganze östliche Halbkugel. Eine merkwürdige disjunkte Verbreitung zeigt die Gattung Erythromma: sie findet sich in Europa, im gemäßigten Asien sowie Nordamerika und tritt dann unvermittelt wieder in Chile auf.

37. **Neuropteren.** A. Sialiden. Unter den eigentlichen Neuropteren ist die Familie der Sialiden an das Wasser gebunden. Es sind meist düster gefärbte Insekten, welche im Frühling oft massenhaft träge an Pflanzen, Holzwerk in der Nähe der Ufer sitzen. Die Eier werden dicht gedrängt an Schilf, Baumzweigen über dem Wasserspiegel abgelegt; die Larven,

ausgezeichnet durch den Besitz gegliederter Tracheenkiemen am Abdomen, leben im Schlamme am Grunde der Gewässer, von wo sie zur Verpuppung an das Land gehen. Bei uns ist nur die Gattung Sialis in zwei Arten vertreten; sie bewohnt die ganze paläarktische und nearktische Region und tritt dann in Chile wieder auf. Weit reicher an Sialiden ist Nordamerika: hier finden sich neben Sialis noch die Gattungen Chauliodes, Neuromus und Corydalis, letztere riesenhafte Neuropteren von 10 bis 14 cm Flügelspannung, deren Männchen durch die gewaltigen sichelartig gekrümmten Mandibel einen höchst auffallenden Anblick darbieten.

B. Megalopteren. Von dieser Familie lebt die Larve von Osmylus chrysops unter Steinen von Bachufern, wo sie mit ihren langen Saugzangen andere Insekten aussaugt. Die mit gegliederten abdominalen Tracheenkiemen versehene Larve von Sisyra schmarotzt in Spongillen-Polstern und Bryozoenkolonien.

38. **Trichopteren.** Die Trichopteren haben im Gegensatz zu allen übrigen Insekten von jeher weit mehr durch den Kunstbauten ihrer Larven die Aufmerksamkeit auf sich gelenkt als durch die ausgebildeten Tiere. Diese finden sich vom März bis spät in den Herbst an den Ufern der verschiedensten Gewässer, wo sie bei Tage meist ruhig an Büschen, Mauern, Planken sitzen, gegen Abend jedoch, oft zu großen Scharen vereint, einzelstehende Bäume, Brückenpfeiler und ähnliche hervorragende Gegenstände in tanzendem Fluge umschweben. Manche schwärmen auch bei hellem Sonnenschein über Wasserflächen und Bergbächen. Die Eier werden fast durchweg in das Wasser abgelegt, wobei die Weibchen vielfach untertauchen müssen. Der Laich selbst zeigt sehr verschiedenes Aussehen. Sehr oft sind die Eier in ansehnliche kranzförmige, klumpen- oder kuchenförmige Gallertmassen eingebettet, die an Steinen oder Pflanzen befestigt werden; in anderen Fällen haften die Eier durch eine Kittmasse vereint, in flachen Krusten an Steinen oder Seerosenblättern. Glyphotaelius legt seinen Laich an über das Wasser ragende Bäume und Sträucher, von wo bei Regen die jungen Larven mit der abtropfenden Gallerte in ihr eigentliches Element eingespült werden.

Die überwiegende Mehrzahl der Köcherfliegenlarven baut sich zum Schutze Gehäuse, die in Gestalt und Material große Mannigfaltigkeit aufweisen. Frei an der Unterseite von Steinen fließender Gewässer leben die Larven von Rhyacophila, während Hydropsyche sich durch lockere Gespinstmassen vor der Gefahr des Abgeschwemmtwerdens schützt; Philopotamus und Polycentropus verfertigen unter und zwischen Steinen von Bächen größere Gespinnstsäcke, welche auch als Fangnetz für von oben her zutreibende Nahrungsstoffe dienen. Gewundene sandinkrustierte Gänge an Steinen in Gebirgsbäche baut Tinodes. Die übrigen Larven bewohnen transportable Gehäuse. Diejenigen der Hydroptiliden, unserer kleinsten Trichopteren, bestehen im wesentlichen aus Gespinnststoff und zeigen in jeder Gattung eine ganz charakteristische Gestalt: flaschenförmig sind die Gehäuse von Oxyethira, nierenförmig bei Hydroptila, von Gestalt eines Kümmelsamens bei Orthotrichia, ähnlich einem Brillenfutteral bei Agraylea und Ptilocolepus der Gebirgsbäche, der seine Gehäuse aus Moosblattstückchen aufbaut. Die übrigen Familien der Köcherfliegen mit wenigen Ausnahmen festigen ihre Gehäuse mit Fremdkörpern, vor allem mit Sandkörnchen, Holz- und Blattstückchen, Früchten von Wasserpflanzen, kleinen Schnecken und Muscheln usw. Bei der Familie der Phryganiden, deren Larven ruhige pflanzenreiche Gewässer bewohnen, bestehen die Gehäuse aus Vegetabilien, meist in spiraliger Anordnung; Agrypnia bezieht als Wohnung Stücke von Rohrstengeln. Unter den Molanniden zeigt die Gattung Molanna auf Sandgrund von Flüssen und Seen sehr charakteristische flach schildförmige Gehäuse. Die Leptoceriden, Bewohner stehender Gewässer, tragen füllhornartige Köcher aus Sandkörnchen oder aus Vegetabilien wie bei der Gattung Triaenodes, die vielfach auch frei umherschwimmt. Die größte Mannigfaltigkeit in Gestalt und Material — bisweilen auch bei ein und derselben Art — zeigen die Gehäuse der Limnophiliden, welche die verschiedensten Gewässer bewohnen und eine Anzahl der häufigsten Trichopteren umfassen. Das Gehäuse von Glyphotaelius besteht aus großen Blattstücken, das von Limnophilus stigma gleicht täuschend einer Erlenfrucht, Anabolia laevis befestigt am Köcher einzelne überragende Stengelstücke von Pflanzen. Ausgesprochen rheophil sind die Larven der Sericostomatiden, deren Gehäuse vielfach Anpassungen an das Leben im fließenden Wasser erkennen lassen. Bei Goera und Silo sind der eigentliche Köcher seitlich mit größeren Steinchen beschwert, die als „Retentionsapparate" dienen sollen. Das Gehäuse von Thremma gallicum hat die größte Aehnlichkeit mit der Schale von Ancylus fluviatilis und wird wie dasjenige der Schnecke fest an die Steine der Gebirgsbäche angepreßt. Bei der nahe verwandten Gattung Helicopsyche ist das Gehäuse schneckenförmig eingerollt und gleicht demjenigen einer Valvata. Gehäuse von vierkantigem Querschnitt bauen Brachycentrus und Crunoecia; als Material werden Vegetabilien verwendet. Nur aus Gespinnststoff bestehen die röhrenförmigen Köcher von Micrasema, die oft dichtgedrängt an Steinen und Moospolstern der Gebirgsbäche sitzen.

Die Larven der Trichopteren leben hauptsächlich von pflanzlichen Stoffen, mehr karnivor sind die Rhyacophiliden und Philopotamiden. Die Atmung erfolgt durch Tracheenkiemen, seltener durch Rektalkiemen; kiemenlos sind die winzigen Larven der Hydroptiliden mit Ausnahme von Ithytrichia. Bei der Verpuppung werden die Gehäuse meist an Steinen oder Pflanzen befestigt und beide Oeffnungen durch verschieden gestaltete Siebmembranen verschlossen, deren Oeffnungen die ziemlich lebhafte Puppe durch besondere Putzapparate — Borstengruppen an der Oberlippe und am Hinterende — vor Verschlammung bewahrt. Trichopterenlarven ohne feste Köcher wie Rhyacophila, Hydropsyche, Philopotamus bauen bei der Verpuppung ein Schutzgehäuse aus kleinen Steinchen, in welchem die Puppe, von einem allseits geschlossenen Kokon umgeben, bewegungslos ruht.

Die Trichopteren sind in unserer Fauna durch zahlreiche Gattungen und Arten vertreten,

welche sich von den Niederungen bis weit in die Hochgebirge hinauf verbreiten. Stehende und fließende Gewässer, Gebirge und Ebenen haben ihre bestimmten Charakterformen. Bewohner kühler Gebirgsquellen sind Crunoecia, Adicella filicornis, Ptilocolepus; an überrieselten Felsen lebt Stactobia. Sehr beträchtlich ist die Zahl von Bergbach-Trichopteren: als besonders typische Beispiele seien genannt die Gattungen Rhyacophila, Glossosoma, Philopotamus, Asynarchus, Drusus, Apatania, Thremma, Micrasema, Sericostoma. Träge pflanzenreiche Bäche der Niederungen lieben Arten von Hydropsyche und Limnophilus, weiter Anabolia, Allophylax, Lepidostoma; größere Flüsse werden hauptsächlich von Hydropsyche pellucidula und Brachycentrus subnubilus bewohnt. Stagnierende Gewässer mit üppiger Vegetation sind, besonders in den Ebenen, die Heimat der großen Phryganiden (Phryganea, Neuronia, Agrypnia), weiter der Gattungen Holocentropus, Oecoetis, wie einer Anzahl Hydroptiliden (Oxyethira costalis, Oxyethira Fagesii, Agraylea); eine Moorform ist Erotesis baltica. Trichopteren von arktisch-alpinem Gepräge und darum in ihrem Vorkommen auf die Alpen und höheren Mittelgebirge beschränkt, dann aber im Norden wieder auftretend sind Asynarchus coenosus, Psilopteryx Zimmeri, mehrere Drusus- und Stenophylax-Arten, Rhyacophila septentrionalis. Als rein alpin gelten Acrophylax cerberus, Platyphylax pallescens, Anisogamus, weiter mehrere Arten der Gattung Drusus. Formen, die durch ihre Verbreitung auf den Süden als eigentliche Heimat weisen, sind unter den Trichopteren der warmen Gewässer der Ebenen bis jetzt kaum bekannt, dagegen bemerkenswerterweise aus Gebirgsbächen Südwestdeutschlands, wo Rhyacophila aquitanica, Thremma gallicum, Stactobia fuscicornis und St. Eatoniella in Vogesen, Schwarzwald und Odenwald die Nordostgrenze ihrer Verbreitung erreichen.

Mit Ausnahme der Calamoceratiden, die aber schon in Südeuropa auftreten, sind bei uns sämtliche Familien der Trichopteren vertreten. Die Mehrzahl der heimischen Gattungen zeigt eine weite Verbreitung über Europa, Nordasien und Nordamerika, doch sind in letztgenanntem Lande (wie bei den Ephemeriden) die Arten fast durchgängig spezifisch verschieden von den unseren. Kosmopolitisch ist die Gattung Hydropsyche, auch Setodes und Limnophilus sind weit verbreitet. Unter den tropischen Gattungen sind namentlich aus Brasilien einige biologisch interessante Larven bekannt geworden wie die von Phylloicus bromeliarum, welche in Regenwasseransammlungen zwischen Bromelienblättern auf Bäumen lebt und Rhyacopsyche Hageni, welche in reißenden Bergbächen ihren Köcher durch einen elastischen Stil verankert. Die außer Afrika in wärmeren Klimaten weit verbreitete Gattung Helicopsyche erreicht in Europa mit Helicopsyche sperata den Südfuß der Alpen.

39. **Lepidopteren.** Nur ganz wenige Lepidopteren-Raupen haben sich dem Wasserleben angepaßt. Bei uns sind es ausschließlich solche von Kleinschmetterlingen aus der Ordnung der Pyraliden. Acentropus niveus, in vegetationsreichen Altwassern und Seen durch das zentrale und nördliche Europa zerstreut, besitzt in seiner Frühjahrsgeneration fast flügellose Weibchen, die unter Wasser leben. Die Raupen hausen frei oder zwischen zusammengesponnenen Blättern an verschiedenen Wasserpflanzen, wo auch das lufterfüllte silberglänzende Puppengespinst befestigt wird. Viel häufiger als Acentropus sind die Raupen von Cataclysta lemnata, welche in Teichen und Gräben Hülsen von Wasserlinsen oder hohle Stengelstücke bewohnen; in Brasilien gehen Cataclistaraupen selbst in reißende Gebirgsbäche. Weit verbreitet ist auch Nymphula nymphaeata, deren erwachsene Raupen zwischen zwei zusammengesponnenen Blattstückchen leben. Alle diese Formen sind auf Luftatmung durch offene Stigmen angewiesen im Gegensatz zu den Raupen von Paraponyx stratiotata, die echte reihenweise angeordnete Tracheenkiemen besitzt.

Aus den Tropen Südamerikas sind auch aquatile Raupen von Großschmetterlingen bekannt geworden, welche der Gattung Palustra, einer Bombycide aus der Verwandtschaft unseres Prozessionsspinners, angehören. Dieselben leben gesellig unter Wasser und kommen nur zeitweilig an die Oberfläche, um ihren Bedarf an Atemluft in dem dichten Besatz von Bürstenhaaren mit hinunter zu nehmen.

40. **Hymenopteren.** Unter den Hymenopteren geht eine Anzahl Schlupfwespen zum Zwecke der Eiablage oft längere Zeit unter Wasser. Eine der bekanntesten Formen ist Agriotypus armatus, der seine Eier in Bach-Trichopteren, besonders diejenigen der Gattung Silo ablegt; die infizierten Gehäuse der Köcherfliegen sind leicht kenntlich an einem sehr langen riemenartigen Fortsatz, den der Parasit vor seiner Verpuppung spinnt. In stehenden Gewässern leben Prestwichia aquatica, deren Larven in den Eiern der Wasserwanze Ranatra schmarotzen, weiter Anaphes cinctus (Polynema natans) und Anagrus subfuscus, welche die Eier von Calopteryx infizieren. Alle diese vermögen mit Hilfe ihrer Beine und Flügel zu schwimmen. Ektoparasitisch an Trichopterenlarven der Gattungen Limnophilus und Neuronia sitzt die Larve von Hemiteles biannulatus. Weiter wurden unter Wasser beobachtet die Braconiden Chorebus natator, Gyrocampa stagnalis, Dacnusa Rousseaui sowie Giardinaia urinator, deren Puppe an einem Laichkraut (Potamogeton pectinatus) gefunden wurde.

41. **Dipteren.** Fliegenlarven gehören zu den häufigsten Insekten fast aller Gewässer. An Zahl und biologischer Bedeutung überwiegen weit die mit Kopf und wohl ausgebildeten Mundwerkzeugen versehenen eucephalen Larven, zu denen die Culiciden, Dixiden, Chironomiden, Ptychopteriden, Psychodiden, Blepharoceriden gehören; acephal sind die Larven der Tipuliden, Stratyomytiden, Tabaniden und Leptiden.

Die größten Dipterenlarven gehören der Familie der Tipuliden an. Diejenige von Pedicia rivosa erreicht 4 bis 5 cm Länge und findet sich zwischen Laub und Pflanzen in klaren Gebirgsbächen. Im Moosrasen von Bächen und Teichen und durch ihre braungrüne Färbung sowie zahlreiche Dornen der Umgebung weitgehend angepaßt, hängen die trägen Larven

von Phalacrocera und Cylindrotoma. Eine Schlammform stellt Dicranota dar. Ueberrieselte sonnige Felswände bewohnen die Larven von Elliptera, Dicranomya und Dactylolabis. In der kleinen Familie der Psychodiden leben Ulomya und Pericoma in reinen Gebirgsbächen oder an nassen Felsen, während Psychoda die schmutzigsten Abwässer und Kloaken aufsucht. Saprob in Pfützen und Tümpeln mit faulendem Schlamm haust Ptychoptera (Liriope) als einzige Vertreterin der Familie der Ptychopteriden.

Im Gegensatz zu diesen Bodenformen bevölkern die lebhaft beweglichen Culicidenlarven das freie Wasser. Die glasartig durchsichtige räuberische Larve von Corethra schwebt frei über dem Boden von Teichen und nicht allzu tiefen Seen, Mochlonyx liebt Waldtümpel mit moderndem Laub. Die Larven von Culex erfüllen oft in ungeheuren Scharen seichte an organischen Stoffen reiche Pfützen und Tümpel, Anopheles, der Ueberträger der Malaria, verlangt im allgemeinen reineres Wasser mit Pflanzenwuchs und kommt in den Tropen auch in den mit Regenwasser erfüllten Blattwinkeln der Bromeliaceen und Palmen hoch über der Erde vor. Beide Gattungen entwickeln sich am zahlreichsten während der wärmeren Jahreszeit; in milderen Gegenden wie z. B. schon in der Oberrheinebene überwintern die Larven nicht selten. Während Culex in etwa 200 Arten über die ganze Erde verbreitet ist, bevorzugt Anopheles mehr die wärmeren Klimate und geht weniger weit nach Norden sowie in die Höhe als Culex. Durchaus auf tropische Gewässer beschränkt sind die Larven der südamerikanischen Gattungen Megarhinus, Sabetes, Limatus, deren Schnaken in prächtigem Metallglanze schimmern; Mansonia bewohnt Afrika und Südamerika, Myzomya die Tropen bis Südeuropa. Stegomya, die Ueberträgerin des gelben Fiebers, ist auf die Tropen und Subtropen bis etwa zum 48. Grad nördlicher und südlicher Breite beschränkt. Den Culiciden verwandt sind die Dixiden, von denen sich die meist U-förmig gekrümmten Larven von Dixa in Moor- und Waldgewässern sowie an überrieselten Felsen finden, hier öfter in Gesellschaft der durch eigentümliche schnickende Bewegungen auffallenden Larven von Orphnephila, der einzigen Vertreterin der gleichnamigen Familie.

Die größte Mannigfaltigkeit in Vorkommen und Lebensweise zeigen die Larven der Chironomiden (Tendipediden). Sie fehlen kaum irgendeinem nicht allzu ephemeren Gewässer: von den Tiefen unserer Seen an, wo die Larven von Orthocladius und Tanytarsus den Grundschlick bevölkern, bis hinauf zu den kümmerlichen Moosrasen der eisigen Gletscherbäche, überall sind die Chironomiden vertreten und bisweilen in solchen Massen, daß die Hochzeitsflüge dieser „Zuckmücken" wie Rauchsäulen an den Ufern der Flüsse auf und niederwallen. Frei zwischen Pflanzen in stehenden und langsam fließenden Gewässern leben die räuberischen Larven von Ceratapogon und Tanypus. Einfache Gallert- oder Gespinnströhren an Pflanzen, Steinen oder auch auf dem Schlamm von Tümpeln, Teichen, Seen und Bächen bauen zahlreiche Arten der Gattungen Orthocladius, Diamesa, Camptocladius, Trichocladius, Cricotopus; im Schlamm, die beiden Enden kraterartig über den Untergrund erhoben, stecken, oft zu Tausenden vereint, die Röhren von Chironomus, dessen rote und gelbe Larven zahlreichen Fischen als Nahrung dienen. Feste sandinkrustierte Röhren, versteift durch Kiele, welche vorn in „Fanghaken" auslaufen, zwischen denen die Larve Gespinnstfäden zum Auffangen der Beute spannt, zeigt die Gattung Tanytarsus: ihre Gehäuse überziehen oft dicht gedrängt moosartig Steine und Pflanzen in Flüssen und Bächen oder stehen hier mit Hilfe eines elastischen Stieles frei vom Substrate ab. Flutende durch Diatomeen braungefärbte Gallertschläuche in Gebirgsbächen und Flüssen der Ebene bewohnt Orthocladius rivularis. Neben diesen festsitzenden gibt es auch frei bewegliche Chironomidengehäuse, die außerordentlich an die Köcher gewisser Trichopteren erinnern; sie gehören hauptsächlich der Gattung Orthocladius an und finden sich fast ausschließlich in dicht verwachsenen moosreichen Wiesenmooren. Ein mit Algenfäden überwachsenes tonnenförmiges Gallertgehäuse schleppt Psectrocladius umher, der zwischen Spirogyrawatten in Gräben und Teichen haust. Im Blattgewebe verschiedener Wasserpflanzen (Potamogeton, Stratiotes) minieren die Larven von Cricotopus brevipalpis und einiger Tanytarsusarten.

Eine biologisch hochinteressante Familie der Dipteren stellen die Blepharoceriden dar. Ihre Larven (Fig. 10) zeigen die weitgehendsten Anpassungen an die rheophile Lebensweise: flachgedrückt, fast asselartig, mit tiefen Strikturen zwischen den Körpersegmenten, haften sie mit Saugnäpfen äußerst fest an Felsen und Steinen kühler Gebirgsbäche, mit besonderer Vorliebe in der Nähe von Wasserfällen. Hier sitzen auch oft dicht gedrängt die schildförmigen dunklen Puppengehäuse; die ausschlüpfenden, äußerst zarten, langbeinigen Fliegen tanzen gegen Abend in Scharen über den Bächen. Bei uns ist neben Blepharocera nur die Gattung Liponeura vertreten, die in zwei Arten die Alpen und die höheren Mittelgebirge bewohnt und auch in Nordamerika vorkommt; ihr gehören die hier abgebildeten Larven an. Die Gattung Curupira ist zuerst aus Brasilien be—schrieben worden wo ihre Larven ganz nach Art unser Liponeuren in reißenden Gebirgsbächen leben.

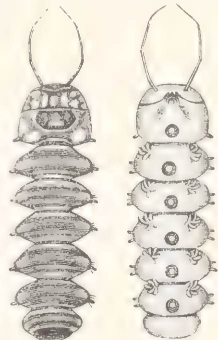


Fig. 10. Larve der Fliege Liponeura brevirostris Dorsale und ventrale Ansicht. Nach Simroth.

Durchaus rheophil sind auch die Larven der Simuliden mit der Gattung Simulium (Me-

lusina). Zu Tausenden bevölkern sie, an Steinen und Pflanzen angesponnen, unsere Bäche und Flüsse, wo auch ihre charakteristischen Puppengehäuse befestigt sind. Ihre Individuenmenge ist bisweilen eine so gewaltige, daß die Scharen dieser „Kriebelmücken“ (besonders Simulium columbaczense) an der unteren Donau Weidevieh durch ihre Stiche töten; ähnliches wird aus Nordamerika berichtet.

Unter den Larven der Stratiomytiden leben einige aquatil: diejenigen von Stratiomys finden sich zwischen Pflanzen in Tümpeln und Teichen und scheuen auch schmutziges Wasser nicht; Oxycera lebt an überrieselten Felsen. Die Larve der Syrphide Eristalis kriecht im stinkenden Schlamm von Kloaken und Abwassergräben. Von Tabaniden ist die Larve von Tabanus cordiger im Sande von Bächen gefunden worden. Unter den Leptiden legen die Weibchen von Atherix ibis, oft zu vielen Hunderten vereint, ihre Eier gemeinsam an Zweige, die über das Wasser hängen und bilden hier nach ihrem Absterben zusammen mit den Eiermassen große Klumpen. Die ausschlüpfenden Larven — auffallend durch das lang ausgezogene zugespitzte Vorderende und zahlreiche Afterbeine — fallen schließlich in das Wasser; sie sind in Flüssen und in Gebirgsbächen zwischen Moospolstern an Steinen nicht selten. Im Blattgewebe verschiedener Wasserpflanzen (Potamogeton, Stratiotes) minieren die Larven von Hydrellia aus der Familie der Ephydriden, deren kleine Fliegen oft in Scharen auf dem Spiegel unserer Gewässer hin und herlaufen.

42. **Coleopteren.** Im Gegensatz zu den bisher behandelten Insektenordnungen gehört die Mehrzahl der Wasserkäfer dauernd dem feuchten Elemente an, Larve und Imago leben in demselben Medium. Viele vermögen fliegend neue Wohngewässer aufzusuchen. Typische Wasserkäfer sind die karnivoren Halipliden, Hygrobiiden, Amphizoiden, Dytisciden, Gyriniden, sowie die mehr herbivoren Hydrophiliden und Elmiden; dazu kommen noch einige Vertreter aus den Familien der Curculioniden und Chrysomeliden. Die Helodiden sowie die Donaciiden gehören fast nur als Larven dem Wasser an.

Die Halipliden sind kleine Käfer, welche klare Gewässer bevorzugen; ihre stark chitinisierten mit langen dornenartigen Fortsätzen bewehrten Larven leben träge an Wasserpflanzen, besonders an Characeen. Die Hauptgattung Haliplus ist in zahlreichen Arten über alle Erdteile verbreitet. Die Familie der Hygrobiiden umfaßt nur die einzige Gattung Hygrobia (Pelobius) mit ganz wenigen Arten in Europa, China und Australien; die schlammreiche Gewässer liebende Larve trägt Blutkiemen an der Ventralseite des Körpers. Durch ihre geographische Verbreitung bemerkenswert ist die Familie der Amphizoiden, ebenfalls nur mit einer einzigen Gattung Amphizoa, deren drei Arten kalte Gebirgsbäche im westlichen Nordamerika sowie in Osttibet bewohnen.

Ueberaus reich an Arten und Gattungen sind die Dytisciden, als Käfer und Larven sehr räuberische Tiere, die über alle Erdteile verbreitet sind. Europa und Sibirien haben mit Nordamerika zahlreiche Gattungen aber nur äußerst wenige Arten von nordischem Gepräge gemeinsam. Als Wohnorte dienen die verschiedensten stehenden und fließenden Gewässer von den warmen Ebenen bis zu den Schmelzwassertümpeln und Gletscherbächen der Hochalpen und des hohen Nordens, wo überall charakteristische Arten vertreten sind. Eine Anzahl Formen zeigt arkto-alpine Verbreitung: sie finden sich in Lappland, Sibirien, den Hochalpen sowie als Glazialrelikte auch in kühlen Gewässern der dazwischen liegenden Mittelgebirge. Beispiele hierfür bieten Agabus Solieri, Hydroporus Sanmarki, Hydroporus borealis, Dytiscus lapponicus. Die größten Arten und trefflichsten Schwimmer gehören der Gattung Dytiscus an, welche in den gemäßigten und kühleren Regionen der alten und neuen Welt verbreitet ist. Bei den Larven erscheint die Mundöffnung verkümmert: die Nahrungsaufnahme erfolgt in der Weise, daß durch die sichelförmigen an der Spitze durchbohrten Mandibel ein toxisches und eiweißlösendes Ferment in die Beute übertritt, das die Gewebe rasch verflüssigt, peptonisiert und zur Aufsaugung geeignet macht. Verwandt ist die Gattung Cybister, die, abweichend von der Mehrzahl der übrigen Dytisciden, in den Tropen ihre Hauptentfaltung zeigt. Die Gattung Hydroporus, eine der artenreichsten unter allen Wasserinsekten überhaupt, stellt neben Teich- und Tümpelformen auch zahlreiche Bewohner kühler Bergwasser, wo auch die Agabusarten am reichsten entwickelt sind. Schlammige Kleingewässer bergen die Gattungen Ilybius, Colymbetes, Laccophilus, Hydaticus usw. Ein Bewohner des Grundwassers, und von hier bisweilen in tiefe Brunnen übertretend, ist die blinde Siettitia balsetensis, die bisher nur in Frankreich gefunden wurde.

Auf dem Spiegel stehender und langsam fließender Gewässer tummeln sich oft in Scharen die behenden Gyriniden, durch ihre quergeteilten Augen befähigt gleichzeitig über und unter Wasser zu spähen; trübes und kaltes Wetter scheucht sie in die Tiefe. Die gestreckten Larven tragen an den Seiten gefiederte Tracheenkiemen, sie leben hauptsächlich unter Steinen und nähren sich wie die Käfer von Würmern, kleinen Insekten usw. Die Hauptgattung Gyrinus ist kosmopolitisch verbreitet, Dineutes bewohnt alle Erdteile außer Europa. Rein tropisch sind die über 2 cm Länge erreichenden Gattungen Porrhorhynchus in Indien und auf den Sundainseln, Enhydrus in Mittelamerika. Orectochilus auf unsern Bächen und Flüssen führt eine mehr nächtliche Lebensweise.

Die Hydrophiliden umfassen sehr kleine bis sehr große, meist düster gefärbte schwimmende und kriechende Käfer, die sich im Gegensatz zu den Dytisciden meist mehr von Pflanzenstoffen nähren. Die Hauptgattung ist Hydrous (früher Hydrophilus), bei uns in zwei stattlichen Arten vertreten, welche stehende Gewässer bewohnen. Die Eier werden in eigenartigen mit einem zigarrenförmig gedrehten Schlote versehenen Kokons an die Unterseite von Schwimmblättern befestigt, die großen weichhäutigen Larven leben hauptsächlich von Schnecken, die Puppe ruht am Ufer. Schwimmer sind außerdem noch die Gattungen Hydrobius, weiter Hydrophilus und Berosus, deren

Larven am Hinterleib seitliche Fortsätze tragen, die als Kiemen gedeutet werden. Die übrigen Hydrophiliden, fast durchweg sehr kleine Tiere, kriechen und klettern an Pflanzen und Steinen umher. Stehende Gewässer bevorzugen die Gattungen Spercheus und Helochares, welche ihre Eier an der Bauchseite mit herumschleppen, dann Hydrochus, Philydrus und Helophorus, letztere mit einer Anzahl Vertreter in Schmelzwassertümpeln der Hochgebirge (Helophorus glacialis, H. nivalis). In Moospolstern sowie an Steinen von Bächen und Flüssen leben die kleinen Arten von Hydraena.

Typisch rheophil ist die Familie der Helmiden. Die kleinen dunklen starkbekrallten Käfer der Gattungen Helmis, Limnius, Riolus klettern an Steinen und Moospolstern von Bächen und Flüssen. Ihre asselartigen flachen am Rande gefransten Larven vermögen sich der Unterlage sehr fest anzuschmiegen; sie atmen durch sternförmig vom Hinterende ausgehende retraktile Tracheenkiemen. Die Käfer der Gattungen Potamophilus und Macronychus sitzen träge an Bohlen, Floßholz, Faschinen in Flüssen; die Larven des letzteren findet sich öfter zusammen mit Spongillen.

Von Curculioniden hausen Eubrychius velutus und Litodactylus leucogaster in Gräben und Teichen dauernd unter Wasser, wo sie an submersen Pflanzen wie Myriophyllum herumklettern.

Amphibiotisch leben die Helodiden (Cyphoniden) sowie die Donaciden. Die Käfer der Helodiden finden sich am Lande auf Sträuchern und Blüten, während die asselartigen langfühlerigen braunen Larven besonders in fließenden Gewässern an Steinen und Pflanzen sich bergen. Von den Donaciden schwirren die meist metallisch glänzenden Käfer der Gattung Donacia und Plateumaris im Sonnenschein um hohe Sumpf- und Uferpflanzen sowie Seerosenblätter, an deren Unterseite Donacia crassipes ihre Eier in Bogenreihen ablegt. Die madenartig plumpen bleichen Larven haften unter Wasser an den Rhizomen oder am Grunde der Stengel von Typha und Sparaganium usw., die sie mit zwei dornenartig verlängerten Fortsätzen der Stigmen des achten Bauchsegmentes anbohren, um aus den Intercellularräumen der Pflanzen ihre Atemluft zu entnehmen. Die Puppen hängen in lufterfüllten Kokons an den Wurzeln. Ständig unter Wasser leben die Käfer der Gattung Macroplea (Haemonia), welche in pflanzenreichen Flüssen, Seen und Strombuchten an Stengeln von Potamogeton natans und ähnlichen Pflanzen auf und abklettern. Die Larven und Puppen gleichen denen von Donacia. Von den eigentlichen Chrysomeliden bewohnt Galerucella nymphaeae die Schwimmblätter von Nymphaeen und Limnanthemum, in welche die schwärzliche Larve große Löcher nagt. Die Art findet sich auch in Nordamerika.

43. **Rhynchoten.** Rhynchoten leben in einer Reihe kosmopolitisch verbreiteter Gattungen in und auf dem Wasser unserer Tümpel, Teiche, Seen, Bäche und Flüsse; viele verlassen namentlich des Nachts fliegend ihre Wohngewässer. Alle nähren sich räuberisch von den verschiedensten Insekten, Schnecken und Würmern, die sie aussaugen; die größeren vermögen selbst Fische zu überwältigen.

Eigentliche Wasserwanzen sind zunächst die Nepiden, die bei uns in den beiden Gattungen Nepa und Ranatra mit je einer Art vertreten sind. Nepa cinerea bewohnt schlammige Gewässer, an deren Grunde sie oft schmutzinkrustiert träge auf Beute lauert; zum Atmen steigt sie nach oben und streckt die lange Atemröhre über die Oberfläche empor. Die Eier mit sieben strahlenartigen Fortsätzen an einem Pol werden in morsche Pflanzenstengel abgelegt. Eine ganz ähnliche Lebensweise führt die langgestreckte Ranatra linearis, deren Eier zwei sehr lange divergierende Polfortsätze tragen, die wie die entsprechenden Gebilde des Nepa-Eis der Atmung dienen. Gute Schwimmer sind die Naucoriden, besonders die Gattung Naucoris selbst, ein häufiger Bewohner pflanzenreicher Gewässer; Aphelocheirus lebt rheophil in Flüssen, wo er sich den Tag über unter Steinen und versunkenen Baumstämmen verbirgt. Auf wärmere Klimate beschränkt und in den Tropen in den Gattungen Belostoma, Diplonychus, Zaithia weit verbreitet, ist die Familie der Belostomiden, welche die größten Wasserinsekten umfaßt: Belostoma grande in Brasilien weist eine Länge von über 10 cm auf. Einzelne Vertreter erreichen noch die mediterrane Region, wo Belostoma europaeum von Griechenland bis Dalmatien vordringt. Die abgelegten Eier werden in kuchenförmigen Massen von den Männchen auf dem Rücken mit herumgeschleppt. Von den Notonectiden gehören die Gattungen Notonecta und Plea unserer Fauna an. Notonecta ist durch drei Arten vertreten, von denen Notonecta glauca in stehenden Gewässern allenthalben verbreitet ist, während N. marmorata mehr dem Süden, N. lutea mehr dem Norden angehört. Plea tummelt sich mehr in kleinen mit Lemna übergrünten Tümpeln und Teichen. Die größte Artenzahl unter den heimischen Wasserwanzen zeigen die Corixiden, speziell die Gattung Corixa mit mehreren Untergattungen. Sie bewohnen stehende und fließende klare Gewässer bis in die Tümpel und Seen der Hochgebirge hinauf, wo Corixa cognata und C. carinata alpine Charakterformen darstellen; die letztgenannte findet sich auch in Finland und Lappland. In welchen Massen Corixa-Arten in den Tropen erscheinen, geht daraus hervor, daß in Mexiko ihre kuchenförmigen Eimassen gesammelt und verspeist werden; auch die Wanzen selbst dienen dort wie in Aegypten zur Nahrung. Die Gattung Micronecta (Sigara) umfaßt winzige, nur etwa 2 mm lange Tiere, die mit besonderer Vorliebe und meist scharenweise vereint, seichte schlickreiche Flußbuchten und Seeufer bewohnen, wo ihre lehmgelbe Färbung trefflich mit dem Untergrund harmoniert. Die Männchen von Micronecta und Corixa lassen zeitweise ziemlich weit hörbare zirpende Töne vernehmen.

Von den auf dem Wasser lebenden Rhynchoten sind am bekanntesten die langbeinigen Gerris-Arten, die, durch einen silberglänzenden lufthaltigen Flaum am Bauch vor Durchnässung bewahrt, ruckweise über den Spiegel stehender und langsam fließender Gewässer dahingleiten, immer eifrig nach Beute spähend. Schattige Waldbäche beleben Velia und Mesovelia. Zwischen den Pflanzenbeständen der Ufer, an überrieselten Felsen stelzt hochbeinig

die nadeldünne Hydrometra stagnorum umher, während die plumperen Hebrusarten mehr Bewohner von dicht überwachsenen Sümpfen und Mooren sind. Von außereuropäischen Wasserläufern dürfte die in Westindien und Nordamerika vorkommende Gattung Rheumatobates jedenfalls die bizarrste Hydrometride darstellen.

Homoptere Rhynchoten sind im Wasser kaum vertreten; eine Aphis aquatica wird aus Nordamerika angegeben. Dagegen saugen Aphiden zahlreich an den verschiedensten Sumpfpflanzen und finden sich öfter in großer Zahl auf den Schwimmblättern von Wasserpflanzen wie Nymphaeen, Limnanthemum, Trapa usw.

Wirbeltiere.

Fische.

Im Fisch erreicht die Tierwelt des Wassers ihren Höhepunkt. Von den Protozoen bis herauf zu den Mollusken und Insekten — fast alles ist ihm tributär und dient ihm direkt oder indirekt zur Nahrung.

44. **Cyclostomen.** Die Cyclostomen umfassen neben einigen ständigen Süßwasserformen meist Wanderfische, welche zum Laichen in die Flüsse aufsteigen. Die Eiablage erfolgt in steinumhegten Gruben auf Geröllboden; die blinden Larven — früher für eine besondere Gattung Ammocoetes gehalten — leben sehr verborgen im Sande von Flüssen und Bächen und werden erst nach etwa drei bis vier Jahren geschlechtsreif. Wanderfische sind bei uns Petromyzon marinus und P. fluviatilis; Petromyzon Planeri verläßt das Süßwasser nicht. Weit reicher an Cyclostomen als Europa ist Nordamerika, dem neben Petromyzon marinus noch die Gattungen Bathymyzon, Ichthyomyzon, Enterosphenus angehören. Auf der südlichen Halbkugel werden die Petromyzonten durch die Gattungen Geotria und Mordacia vertreten, welche Chile sowie Südaustralien und Neuseeland bewohnen. Chile eigentümlich ist die mit riesigen Augen versehene Macrophthalmia chilensis.

45. **Selachier.** Die Haifische und Rochen gehören fast durchweg dem Meere an. Nur in den Tropen treten einige Gattungen auch in die großen Ströme ein, wie Carcharias gangeticus in indische Flüsse sowie in den Euphrat, C. zambesensis in den Zambesi. Carcharias nicaraguensis lebt dauernd im Nicaraguasee, der Sägehai Pristis Parotteti ist im Zambesi erbeutet worden. Paratrygon und Ellipesurus sind Süßwasser-Rochen des nördlichen Südamerika.

46. **Ganoiden.** Von dieser geologisch sehr alten Ordnung leben nur die Acipenseriden meist in küstennahen Meeren der nördlichen Halbkugel, von wo sie zum Laichen die Flüsse besuchen. Die Laichzeit fällt in die Monate April bis Juni, die kleinen überaus zahlreichen Eier werden am Grunde der Gewässer an Geröll und Pflanzen festgeklebt. Die Nahrung besteht aus Würmern, Insektenlarven, besonders Ephemeriden, Mollusken usw., die mit der rüsselartig verlängerten Schnauze aus dem Schlick herausgeschürft werden. West- und Südeuropa besitzen nur Acipenser sturio, den Stör, der auch im atlantischen Nordamerika vorkommt; weitere noch zum Teil sehr große Arten besuchen die Flüsse, welche in das Schwarze und Kaspische Meer münden. Alle übrigen Ganoiden sind ständige Süßwasserfische. Die Gattung Scaphirhynchus, zu den Stören gehörig, zeigt eines der auffallendsten Beispiele disjunkter Verbreitung: drei Arten bewohnen Zentralasien, eine Nordamerika. Letzteres Land besitzt als eigentümlich noch die Gattung Amia, die in pflanzenreichen versumpften Seen lebt, und hier ihre Eier in eine Art Nest ablegt, welches das Männchen bewacht, weiter Lepidosteus in Flüssen und Seen, Polyodon im Gebiete des Mississippi, wo der seltsame Fisch mit Hilfe seiner löffelartig verbreiterten Schnauze den Grund nach Nahrung durchpflügt. Der bis 20 Fuß lange Psephurus gladius ist auf China speziell den Hoangho und Jangtsekiang beschränkt. Tropisch afrikanisch sind Polypterus, dessen Larven äußere gefiederte Kiemen tragen, im Nil und in den westafrikanischen Flüssen, Calamichthys nur in den letzteren.

47. **Dipnoer.** Als letzte Reste der im paläozoischen und mesozoischen Zeitalter einst weitverbreiteten Lungenfische bewohnen die Gattungen Neoceratodus, Protopterus und Lepidosiren die Tropen der alten und neuen Welt mit Ausnahme von Asien. Alle leben träge am Grunde pflanzenerfüllter Gewässer, von wo sie nur zum Atemholen an die Oberfläche steigen. Neoceratodus Forsteri haust in Flußtümpeln des nordöstlichen Australien und nährt sich hier von Crustaceen, Würmern und Schnecken; die mit einer Gallerthülle umgebenen Eier werden einzeln zwischen Pflanzen abgelegt. Protopterus verbreitet sich in drei Arten über das westliche und zentrale Afrika und kommt auch im oberen Nil vor; er bevorzugt als Aufenthalt Sümpfe im Ueberschwemmungsgebiet der Flüsse, deren periodische Austrocknung er im Schlamm verborgen und umhüllt von einer flaschenartigen Cyste im lethargischen Zustande überdauert. Die Eier werden in eine von Pflanzen umgebene nestartige Grube abgelegt und vom Männchen bewacht; die ausschlüpfenden Larven ähneln sehr den Kaulquappen und tragen äußere gefiederte Kiemen. Eine ganz ähnliche Lebensweise führt Lepidosiren paradoxa, die Südamerika speziell das Flußgebiet des Amazonas bewohnt und sich hier hauptsächlich von Fadenalgen und Schnecken ernährt.

48. **Teleosteer.** Die weit überwiegende Mehrzahl der Süßwasserfische gehört zu den Teleosteern, von deren zahlreiche Familien in folgendem nach Boulengers[1]) Einteilung die wichtigsten aufgezählt werden sollen.

A. Malacopterygii. Die Familie der Mormyriden, ausgezeichnet durch eine unter den Fischen einzig dastehende mächtige Entwicklung des Gehirns, umfaßt in der Hauptgattung Mormyrus höchst bizarre Fische, deren Schnauze in einen oft sehr langen dünnen und schnabelartig gekrümmten Fortsatz ausgezogen ist. Sie ist ganz auf das tropische Afrika und den Nil beschränkt, der auch die weitere Gattung Gymnarchus von aalartigem Habitus beherbergt. Nordamerikanisch sind die Hyodontiden (Hyodon), indisch-afrikanisch die Notopteriden (Notopterus). Die Osteoglossiden,

[1]) Cambridge Natural History Vol. VII, S. 541.

mächtige großschuppige Fische, zeigen fast dieselbe geographische Verbreitung wie die Dipnoer, denen einige auch habituell ähneln: Scleropages bewohnt Nordostaustralien, daneben Borneo und Sumatra, Heterotis Zentralafrika und den Nil, Osteoglossum und der riesige bis 4 Zentner schwere Arapaima den Amazonas. Die Pantodontidae besitzen in Pantodon Buchholtzi des Kongo einen fliegenden Fisch des Süßwassers. Phractolaemus Ansorgii lebt als einziger Vertreter der recht isoliert stehenden Familie der Phractolaematiden im Niger und Kongo. Aus der besonders in den gemäßigten Meeren der nördlichen Halbkugel weitverbreiteten art- und individuenreichen Familie der Clupeiden, den heringsartigen Fischen, steigt die Gattung Clupea von der Nord- und Ostsee sowie vom Mittelmeer zum Laichen scharenweise in die Flüsse: Clupea alosa der Maifisch ging früher bis zum Oberrhein, ist hier jetzt aber fast völlig verschwunden; Clupea finta bleibt weiter unten zurück. In den großen südalpinen Seen ist Clupea teilweise Standfisch geworden. Weitere Arten besuchen die Flüsse des atlantischen Nordamerika.

Die Salmoniden bewohnen das Meer und das Süßwasser, letzteres teils als Standfische teils als Laichwanderer. Ihr Verbreitungsgebiet erstreckt sich über ganz Europa, einen kleinen Teil von Nordafrika, das außertropische Asien und Nordamerika. Als ausgeprägte Kaltwasserformen dringen sie am weitesten von allen Fischen polwärts vor: noch auf Grinnelland in 82° 34′ n. B. sind die Saiblinge Salmo arcturus und S. Naresi erbeutet worden. Südlich des Aequators findet sich einzig auf Neuseeland die Stintgattung Retropinna. Die Laichzeit fällt fast durchweg auf den Winter oder Vorfrühling; als Nahrung dienen die verschiedensten Wassertiere bis herab zum Plankton. Die Gattung Trutta ist bei uns zunächst durch Trutta salar den Lachs oder Salm vertreten, der die Nord- und Ostsee, den atlantischen Ozean in Europa bis zum Busen von Biskaya, in Amerika bis zum 41° n. B. herab bewohnt. Von hier an steigt er, leider in immer mehr sich vermindernden Scharen, ohne bei uns irgendwelche Nahrung aufzunehmen bis zum Oberlauf der Flüsse und in die größeren Bäche der Bergregion empor, um dort in großen Gruben auf Kiesgründen seinen Laich abzusetzen; die abgelaichten meist sehr ermatteten Tiere ziehen wieder nach dem Meere zurück, wohin ihnen die Jungen nach ein bis zwei Jahren folgen. In den großen Seen Skandinaviens und Nordamerikas sowie im Baikalsee sind die Lachse teilweise Standfische geworden und die Laichwanderungen erstrecken sich nur in die einmündenden Flüsse. Eine ähnliche Lebensweise wie der Lachs führt Trutta trutta die Meerforelle, nur daß sie viel weniger weit die Flüsse hinaufgeht. Ständige Bewohner des Süßwassers sind **Trutta lacustris** die Seeforelle, die als sterile „Schwebforelle“ und als fruchtbare „Grundforelle“ die tiefen Seen des Alpengebietes bis zu 2600 m Höhe bewohnt und nur zum Laichen in fließendes Wasser übertritt, dann Trutta fario, die allbekannte Bachforelle unserer Gebirge und kühleren Bäche der Ebenen. Trutta macrostigma, die am weitesten nach Süden vordringende Art, ist auf die Bäche des Atlas beschränkt; im pazifischen Amerika geht die bei uns vielfach eingebürgerte Trutta iridea, die Regenbogenforelle, bis zum 33° n. B. herab. Zur Gattung Salmo gehören Salmo hucho, der stattliche Huchen, welcher als Standfisch der Donau und ihren Nebenflüssen angehört und im Frühjahr laicht, weiter Salmo salvelinus, der Saibling der kalten und tiefen Alpenseen, hier bis 1700 m emporsteigend und als Salmo alpinus auch in den Gewässern des Nordens weit verbreitet. Das östliche Nordamerika besitzt S. fontinalis, der als Bachsaibling auch in die fließenden Gewässer Europas verpflanzt wurde. Die Gattung Oncorhynchus vertritt unseren Lachs in den zum stillen Ozean strömenden Flüssen Nordamerikas und Ostasiens. Meerfisch und Süßwasserfisch zugleich ist Osmerus eperlanus der Stint im nördlichen Europa und Nordamerika; die Süßwasserform bleibt stets kleiner als die marine. Mehr Stand- als Wanderfische sind unsere Coregonen, die Felchen, Renken oder Maränen, deren Verbreitungsgebiet Nord- und Mitteleuropa, Nordasien und Nordamerika umfaßt; sie nähren sich durchweg von kleineren Tieren. Nordeuropa bewohnen sie ungefähr so weit, als die große diluviale Vereisung reichte, außerdem auch noch die tiefen Seen am Nordrande der Alpen; den hochgelegenen Alpenseen fehlen sie, ebenso den Gewässern südlich des Gebirgswalles. Die postglaziale Isolierung dieser stenothermen Kaltwasserfische hat hier fast in jedem See besondere Lokalformen ausgeprägt, die eine scharfe Umgrenzung der einzelnen Arten sehr erschweren, ganz besonders seitdem künstliche Einbürgerungen und Verpflanzungen mannigfache Bastardierungen zur Folge hatten. Nordisch sind Coregonus oxyrhynchus, der aus Nord- und Ostsee in die Flüsse zieht, sowie C. lavaretus, der die Küstenseen der Ostsee besucht, weiter als ständige Süßwasserbewohner Coregonus maraena und C. albula. Dazu kommen noch eine Reihe weiterer Arten in Lappland (Coregonus lapponicus usw.) sowie die sehr zahlreichen und oft sehr großen wandernden Coregonen der sibirischen Riesenströme wie Coregonus syrok, C. omul, C. polkur, C. muksun, C. (Stenodus) leucichthys usw. Auch Nordamerika hat eine beträchtliche Zahl eigener Arten. Zu den alpinen Coregonen gehören Coregonus Wartmanni der Blaufelchen, eine Tiefenform des freien Wassers, die sich ausschließlich von Plankton nährt, C. macrophthalmus, dann die Bodenformen C. fera und C. hiemalis (acronius), welche letzterer nur in größeren Tiefen lebt und kaum zur Oberfläche steigt. An die Coregonen schließt sich die Gattung Thymallus an, die raschfließende klare Gebirgsbäche und Flüsse Europas, Nordasiens und Nordamerikas bewohnt. Die einzige bei uns vertretene Art Thymallus thymallus die Aesche laicht im März und April.

B. Ostariophysi. Die Familie der Characiden umfaßt äußerst räuberische mit scharfen Zähnen bewehrte Fische, die in zahlreichen Gattungen und Arten auf das tropische Afrika und Amerika beschränkt sind. Am artenreichsten ist die Gattung Tetragonopterus in beiden Erdteilen. Hydrocyon bewohnt den Nil und die Seen und Ströme Zentralafrikas, Serrosalmo in großen Scharen die Flüsse Südamerikas. Tropisch amerikanisch ist auch die Familie der

Gymnotiden mit Gymnotus electricus dem Zitteraal im Orinoko und Amazonas.

Die Cypriniden sind mit Ausnahme von Südamerika, Madagaskar und der australischen Region über die ganze Erde verbreitet. Ihre Hauptentwicklung fällt auf die nördlich gemäßigte Zone sowie auf Indien; die Mehrzahl der Fische unseres Faunengebiets gehört zu ihnen. Im allgemeinen bevorzugen die Cypriniden stehende pflanzenreiche Gewässer, sind aber auch in nicht zu reißenden Flüssen und Bächen zahlreich vertreten. Es sind meist Friedfische, die sich hauptsächlich von Kleintieren, Algen usw. ernähren; Räuber sind Aspius rapax und teilweise auch Squalius cephalus. Die Laichablage fällt auf die wärmere Jahreszeit, wobei die Fische sich oft zu großen Scharen zusammentuen, so daß Bastarde hier keine seltene Erscheinung sind. Die bei weitem artenreichste Gattung ist Barbus, bei uns nur durch ganz wenige Arten (B. fluviatilis, B. Petenyi im Osten) vertreten, äußerst vielgestaltig und in allen Größenabstufungen dagegen in den Tropen und Subtropen entwickelt, wo die verschiedensten Gewässer als Aufenthaltsort dienen. Amerika fehlt Barbus völlig. In ruhigen Gewässern leben die Gattungen Cyprinus mit Cyprinus carpio dem Karpfen, der bei uns nur in Donau und im Rheingebiet ursprünglich einheimisch war, nun aber weithin und selbst nach anderen Erdteilen verpflanzt worden ist, weiter Carassius, Tinca, Abramis, Blicca, Leuciscus, Scardinius, Rhodeus, der seine Entwickelung in den Kiemen von Muscheln durchmacht. Fließende Gewässer bevorzugen bei uns neben Barbus die Gattungen Aspius, Pelecus, der als Laichwanderer vom Meere her in die Flüsse des Ostens aufsteigt, Alburnus, Chondrostoma, Gobio, Phoxinus, der in den Alpen bis 2500 m hoch empor geht. Aus der Unterfamilie der Acanthopsiden gehören Nemachilus und Cobitis hierher, während Misgurnus fossilis stehende Gewässer bewohnt und hier mit Hilfe seiner Darmatmung in ganz kleinen austrocknenden Tümpeln selbst bei hochgradigem Sauerstoffmangel noch ausdauert. Reißende Bergwasser der indischen Region sind der Aufenthalt der Homalopterinen (Homaloptera, Gastromyzon). Fast ganz auf Amerika beschränkt ist die Unterfamilie der Catastomiden; nur wenige Arten leben auch in Ostasien.

Während die Cypriniden in Gestalt und Lebensweise meist einen gewisse Einheitlichkeit bewahren, zeigen die Siluriden nach beiden Richtungen hin beträchtliche Verschiedenheiten; weit verbreitet ist bei den Welsen jedoch die Bewachung der Eier und ausschlüpfenden Jungen durch die Männchen. Europa besitzt nur zwei Vertreter: den dem Westen fehlenden Wels, Silurus glanis ein gefräßiger Bodenfisch, der über zwei Zentner schwer wird, und dann Parasilurus Aristotelis auf der Balkanhalbinsel. Auch Nordamerika ist nur verhältnismäßig spärlich bedacht und hat als ihm charakteristisch nur die Gattung Amiurus; eine Art kommt auch in China vor. Desto reicher sind die Tropen, ganz besonders Südamerika, wo die Siluriden in äußerst zahlreichen Gattungen mit mehr als 1000 Arten fast alle Gewässer von den trüben periodisch austrocknenden Lagunen an bis zu den kühlen Bergbächen bewohnen. Die größte Artenzahl und weiteste Verbreitung durch das ganze tropische Gebiet zeigt die Gattung Arius, indisch-afrikanisch ist Clarias, südamerikanisch Pimelodus, dann Doras, der während der Trockenzeit die versiegenden Gewässer verläßt und scharenweise über Land nach neuen Wohnstätten wandert. Biologisch bemerkenswert ist Pseudecheneis in indischen Bergbächen, die sich mit Hilfe eines bauchständigen Haftorgans an Steinen festsaugt und so der stärksten Strömung trotzt. Malapterurus der Zitterwels, welcher kräftige elektrische Schläge auszuteilen vermag, findet sich in Flüssen des tropischen Afrika sowie im Nil. Nahe verwandt mit den Siluriden sind die Loricariden, meist kleinere bisweilen fast nadelschlanke Fische, die sich mit ihrem unterständigen Munde an Steine der Gebirgsbäche Süd- und Zentralamerikas festsaugen. Ebenfalls tropisch-amerikanisch sind die Aspredinen, bei denen die Weibchen von Aspredo ihre Eier in einer schwammigen Wucherung der Bauchhaut mit herumtragen.

C. Symbranchii. Zu dieser Unterordnung der Teleostier gehören die Familien der Symbranchiden und Amphipnoiden im tropischen Asien, Australien, Amerika. Der aalartige Amphipnous in Indien besitzt zwei wie Lungen funktionierende Ausstülpungen der Kiemenhöhle, die ihm gestatten längere Zeit außerhalb des Wassers zu leben.

D. Apodes. Die Familie der Anguilliden ist bei uns nur durch den Aal Anguilla anguilla vertreten, der als gefräßiger Raubfisch am schlammigen Grunde stehender und fließender Gewässer lebt. Im Binnenlande kommen so gut wie ausschließlich nur Weibchen vor; die kleineren Männchen leben im Unterlauf der Flüsse sowie im Brackwasser. Im Alter von etwa 7 bis 9 Jahren ziehen die Weibchen in dunklen Frühherbstnächten scharenweise dem Meere zu, um gemeinsam mit den Männchen die Laichgründe aufzusuchen. Dieselben liegen für alle europäischen Aale in den Tiefen des atlantischen Ozeans und erstrecken sich sehr weit nach Westen. Nach dem Laichen scheinen die Tiere abzusterben, jedenfalls kehrt kein erwachsener Aal mehr in die Binnengewässer zurück. Die den Eiern entschlüpfenden Larven, früher als eigene Gattung Leptocephalus beschrieben, sind anfangs glasartig durchsichtig und seitlich stark zusammengedrückt; die Umwandlung in die charakteristische Aalgestalt erfolgt nur ganz allmählich und unter ziemlich starker Verkürzung des Körpers. Während dieser Zeit streben die Jungaale, bekannt unter dem Namen „montée“, in großen Scharen mehr und mehr den Küsten zu und steigen hier, von Westen nach Osten fortschreitend in den Monaten Oktober bis Mai in die Flüsse auf. Den Flüssen des Schwarzen Meeres fehlt der Aal, weil dessen überaus schwefelwasserstoffreiches Tiefenwasser dort ein Laichen unmöglich macht; dagegen findet er sich noch in Nordafrika, weiter in einer sehr nah verwandten Form auch im atlantischen Nordamerika bis Westindien.

E. Haplomi. Die Familie der Galaxiiden ist in der mehrere Arten umfassenden Gattung Galaxius völlig auf die südlichsten Teile von Afrika, Amerika und Australien beschränkt, eine Verbreitung, welche für das ehemalige Vorhandensein eines großen antarktischen Kontinents spricht. Ganz ähnlich verteilt sind auch die

Haplochitoniden, die aber Afrika fehlen. Die Familie der Esociden bewohnt in der Gattung Esox den größten Teil von Europa, das gemäßigte Asien und Nordamerika. Esox lucius der Hecht ist einer der gefräßigsten Raubfische stehender und fließender Gewässer, fehlt aber den höheren Gebirgen. Nordamerika hat außer E. lucius noch einige weitere Arten. Die Gattung Umbra besitzt nur zwei Arten mit weit getrennten Vorkommen: Umbra Krameri in Oesterreich-Ungarn, besonders in Sümpfen am Neusiedler und Plattensee, angeblich auch in Südrußland, U. limi in Nordamerika. Verwandt mit Umbra ist die Gattung Dallia, auch als Vertreter einer besonderen Familie der Dalliiden betrachtet. Die einzige Art Dallia pectoralis, ein gegen Kälte äußerst resistenter Fisch, bevölkert in großer Individuenzahl die Flüsse und moosreichen Teiche von Alaska und Ostsibirien.

Die Cyprinodontiden oder Zahnkarpfen sind kleine oft lebhaft gefärbte meist lebendig gebärende Fische, welche ganz Afrika, Südwestasien, das tropische Amerika sowie das südliche Nordamerika bewohnen und in einzelnen Vertretern wie Fundulus iberus und F. hispanus auch noch Südeuropa erreichen. Sie nähren sich teils von Tieren, teils von Pflanzen und finden sich außer im Süßwasser auch im Brackwasser und Meere. Die Gattungen Gambusia, Poecilia, Mollienesia, Girardinus, Rivulus im wärmeren Amerika nehmen in ihrer Heimat vielfach mit den kleinsten Wassertümpeln vorlieb und gehören bei uns zu den beliebtesten Aquarienfischen. Die Gattung Orestias bewohnt in mehreren Arten den über 4000 m hoch gelegenen Titikakasee. Die den Cyprinodonten nahestehenden Amblyopsiden umfassen in den Gattungen Amblyopsis und Typhlichthys farblose blinde Höhlenfische Nordamerikas.

F. Catosteomi. Die Gasterosteiden oder Stichlinge sind völlig auf die nördliche Hemisphäre beschränkt, wo sie, äußerst resistent gegen die Schwankungen des Salzgehalts, Meer, Brackwasser und Süßwasser bewohnen und im letzteren südlich bis Algier, nördlich bis Island und Grönland gehen. In unserem Gebiete ist Gasterosteus aculeatus mit Ausnahme des Donaugebiets einer der gemeinsten Fische und merkwürdig durch seinen Nestbau, wobei das Männchen Eier und Junge bewacht. Gasterosteus pungitius, unser kleinster Fisch, hält sich mehr im Unterlauf der Flüsse und kommt auch im Donaugebiet vor.

G. Percesoces. Von den meist marinen Scombresociden treten einige Arten der durch den stark verkürzten Unterkiefer auffallenden Gattung Hemirhamphus auch in Flüsse des tropischen Afrika und Amerika ein. Unter den gleichfalls fast ganz auf das Meer beschränkten Atherinen lebt Atherina lacustris in den Kraterseen Italiens. Tropisch asiatisch und afrikanisch sind die Ophiocephaliden und Anabatiden, beide durch gefäßreiche Ausstülpungen der Kiemenhöhle zur Luftatmung befähigt. Ophiocephalus überdauert die periodische Austrocknung seiner Wohngewässer in lethargischem Zustande, Anabas scandens in Indien vermag mit Hilfe seiner bedornten Kiemendeckel und der Strahlen seiner Ventralflossen selbst an rauhen Baumstämmen empor zu klettern.

H. Anacanthini. Von den in den nordischen Meeren in so überaus individuenreichen Scharen vorkommenden Gadiden ist nur die Gattung Lota in das Süßwasser eingedrungen. Die einzige Art L. lota die Aalraupe lebt als Raubfisch und Laichfresser am Grunde von Seen und Flüssen in Zentral- und Nordeuropa, Asien und Nordamerika. Ihre Laichzeit fällt auf Dezember bis Februar.

J. Acanthopterygii. Von den Stachelflossern ist zunächst die Familie der Perciden über die ganze nördliche Halbkugel verbreitet und auch in unserer Fauna durch eine Reihe von Gattungen vertreten. Hierher gehören Perca fluviatilis der Flußbarsch in Europa, Nordasien, Nordamerika, ein Bewohner pflanzenreicher stehender und fließender Gewässer, Acerina mit Acerina cernua in Mittel- und Nordeuropa, Asien, A. schraetser im Donaugebiet, Lucioperca, dem Rhein und ganz Westeuropa ursprünglich fehlend, aber als L. sandra der Zander und L. volgensis im Osten verbreitet. Auf die Donau und die anderen in das Schwarze Meer strömenden Flüsse beschränkt ist die Gattung Aspro mit zwei Arten Aspro streber und A. zingel. Nordamerikanisch sind die Gattungen Boleosoma und Etheostoma. Weiter ist Nordamerika die Heimat der Familie der Centrarchiden mit zahlreichen oft massenhaft auftretenden räuberischen Arten; die meisten laichen in großen Gruben auf Kiesboden und bewachen die Eier und Jungbrut. Bekannt sind die prächtig gefärbten Gattungen Centrarchus, Lepomis, Eupomotis als „Sonnenfisch" vielfach anderwärts eingebürgert und im Oberrhein bereits verwildert, weiter Grystes mit G. salmoides dem Forellenbarsch und Grystes nigricans dem Schwarzbarsch, die ebenfalls bei uns in Teichen gezüchtet werden. Von Indien bis Neuseeland verbreitet sind die Toxotiden mit Toxotes jaculator, der über Wasser sitzende oder fliegende Insekten durch einen ausgespritzten Wasserstrahl herabholt. Die Familie der Serraniden, eine der artenreichsten der Fische überhaupt, umfaßt fast durchweg marine Formen; das Süßwasser bewohnen nur einige amerikanische Labrax-Arten sowie die Gattung Lates in Indien, Australien und Afrika, wo Lates niloticus 1,5 m Länge erreicht. Südostasien und Afrika beherbergen die Familie der Osphromeniden, wegen des Besitzes eines akzessorischen Kiemenorgans früher auch als Labyrinthfische bezeichnet. Hierher gehören Polyacanthus opercularis der beliebte Makropode unserer Aquarien, die reizbare kampflustige Betta pugnax, weiter Osphromenos olfax der Gurami auf den Inseln des Malaiischen Archipels, der wegen seines Wohlgeschmackes auch im tropischen Amerika eingebürgert wurde. Er baut wie die Makropoden an der Oberfläche des Wassers ein Schaumnest zur Aufnahme seiner Eier.

Die Cichliden oder Chromiden bewohnen Syrien und Palästina, ganz Afrika, wo sie besonders im Tanganjika reich und durch charakteristische Arten vertreten sind, Madagaskar, Indien sowie das tropische Amerika nördlich bis Texas. Brutpflege ist sehr verbreitet: bei den sogenannten „Maulbrütern" tragen bald die Männchen oder wie bei den afrikanischen Formen die Weibchen die Eier im Maule mit herum, wo auch die Jung-

fische bei Gefahr eine Zuflucht finden. In Palästina sind die Gattungen Tilapia (T. Simonis, T. Zillii), Paratilapia (P. sacra) häufige Bewohner des Jordan und seiner Seen, und verbreiten sich von hier aus in zahlreichen Arten über Afrika, besonders das Nilgebiet, die großen Seen und Madagaskar. Afrikanisch sind weiter Aspretilapia, Plecodus, amerikanisch Heros in zahlreichen Arten, Cichla, Geophagus, indisch Etroplus — alle neuerdings vielfach in unseren Aquarien gezüchtet.

K. Zeorhombi. Unter den Pleuronectiden geht Pleuronectes flesus die Flunder öfter in das Süßwasser der Flüsse, wo sie in der Elbe bei Magdeburg, im Rhein bis zur Mosel, zum Main und Neckar vordringt. Allem Anschein nach wurden diese Fische während des Mittelalters speziell im Main häufiger erbeutet als jetzt. Pleuronectiden bewohnen auch Flüsse und Seen des Malaiischen Archipels.

L. Gobiiformes. Die Gobiiden besitzen in dem nur 12—18 mm langen Mistichthys luzonensis der Philippinen den kleinsten Fisch und das kleinste Wirbeltier überhaupt. Von den „Meergrundeln“ ist der kleine Gobius fluviatilis in Italien häufig und dringt bis zu den südalpinen Seen vor. Tropisch sind die Gattungen Eleotris in Indien und Afrika, Sicydium, Latipes auf den Sandwichinseln.

M. Scleroparei. Die kleine Familie der Comephoriden umfaßt sehr merkwürdige Tiefseefische des Süßwassers. Die Gattung Comephorus mit zwei Arten Comephorus baicalensis und C. Dybowskii ist völlig auf den Baikalsee beschränkt. Beide sind äußerst zarte Tiere von blaßrötlicher Farbe, welche dauernd die größeren Tiefen bewohnen; sie sind vivipar und sterben nach dem Laichen ab. Die Gattung Triglopsis lebt in der Tiefe des Michigan- und Ontariosees in Nordamerika.

Die Cottiden sind bei uns durch Cottus gobio vertreten, ein Bodenfisch raschfließender Gewässer sowie klarer Seen, die in den Alpen bis 2300 m aufsteigt. Der Laich wird im Frühling an die Unterseite von Steinen usw. abgelegt und von Männchen bewacht. Der im Eismeer verbreitete Cottus quadricornis findet sich als Relikt auch in einigen Seen Skandinaviens, dem Ladogasee sowie in den sibirischen Flüssen. Eine auffallend reiche Entwicklung erlangen die Cottiden in den Tiefen des Baikalsees, wo etwa ein Dutzend Arten in mehreren meist endemischen Gattungen (Asprocottus, Abyssocottus, Limnocottus) vorkommen; Cottomephorus Grewingki wird als Vertreter einer eigenen Familie betrachtet.

N. Jugulares. Die fast ganz marinen Blenniiden stellen nur in der Gattung Blennius auch einige Süßwasserformen wie Blennius vulgaris in den größeren Seen Italiens und Dalmatiens, B. varius und B. lupulus im See von Tiberias in Palästina. Die kleinen Fische lieben felsigen Untergrund und treiben sich meist scharenweise umher. Chimmarichthys aus der Familie der Leptoscopiden bewohnt reißende Bergbäche der Neuseeländer Alpen. Stygicola und Lucifuga, blinde Höhlenfische der Insel Kuba, vertreten die Familie der Zoarciden im Süßwasser.

O. Opisthomi. Diese Unterordnung umfaßt nur die Familie der Mastacembeliden, aalartige Süß- und Brackwasserfische des südlichen Asiens und tropischen Afrika. Mastacembelus armatus ist einer der gemeinsten Fische Indiens, M. aleppensis geht bis Mesopotamien und Syrien.

P. Plectognathi. Fast durchweg Meeresbewohner. Nur die Gattung Tetrodon besitzt neben marinen auch einige Süßwasserformen wie Tetrodon fahaka im Nil und den westafrikanischen Flüssen, T. fluviatilis in Indien und T. psittacus in Brasilien. Die Fische besitzen die Fähigkeit, durch Einschlucken von Luft in den sehr erweiterungsfähigen Kehlsack ihren Körper fast zu einer Kugel aufzublähen.

Amphibien.

Keine Klasse des Tierreichs ist so ausschließlich an das Süßwasser gebunden wie die der Amphibien. Eine Reihe von Familien wie die Amphiumiden, Proteiden, Sireniden unter den Urodelen, die Aglossen unter den Anuren, leben ständig im Wasser, die übrigen machen fast alle hier ihre Entwickelung durch und gehen dann an das feste Land, auf feuchte Wiesen, in schattige Wälder, aber die Laichzeit führt sie doch immer wieder in das Element zurück, dem sie entstammten. Die Verbreitung der Amphibien erstreckt sich über die gemäßigten und tropischen Klimate, den hocharktischen Regionen fehlen sie völlig, obwohl manche von ihnen, besonders die Urodelen, kühle Gewässer lieben und in diesen ziemlich weit in die Hochgebirge emporsteigen.

49. **Gymnophionen.** Die erwachsenen Blindwühlen, alle Bewohner der Tropen Asiens, Afrikas und Amerikas, leben meist sehr verborgen in feuchter Erde, oft in der Nähe von Gewässern. Die Larven der indischen Ichthyophis glutinosa suchen nach Verlust ihrer großen gefiederten embryonalen Kiemen das Wasser auf, wo sie sich aalartig schlängelnd bewegen und zum Atmen an die Oberfläche kommen. Die vivipare Gattung Typhlonectes in Kolumbien hat sich völlig dem Wasserleben angepaßt und nährt sich von Fischen.

50. **Urodelen.** Die Urodelen sind fast ganz auf die nördliche Hemisphäre beschränkt; Plethodon platense bewohnt Argentinien. Besonders reich ist Nordamerika. Hier bewohnt aus der Familie der Amphiumen die aalartige Amphiuma means schlammige Sümpfe im Südosten der Vereinigten Staaten, Cryptobranchus (Menopoma) Gebirgsflüsse im Osten. Der Riesensalamander Megalobatrachus maximus gehört Japan und China an; hier lauert der einsiedlerische Lurch in kühlen Gebirgsbächen, an dunkeln Orten unter Felsen auf Beute, die in Fischen, Amphibien, Würmern und Insekten besteht. Die Familie der Proteiden besitzt in Europa einen einzigen Vertreter, den Olm Proteus anguineus in Höhlen von Krain, Istrien bis nach der Herzegowina, seinem ganzen Vorkommen nach hier wohl ein Relikt aus der Tertiärzeit. Das lichtscheue Tier nährt sich von kleinen Muscheln, Würmern, sowie Crustaceen (Niphargus) und legt entweder Eier ab oder bringt lebendige Junge zur Welt. Verwandt mit dem Olm ist Typhlomolge Rathbuni, bis jetzt nur aus einem tiefen artesischen Brunnen in Texas bekannt. Weiter verbreitet ist Necturus

maculatus, welcher das atlantische Amerika bis zu den kanadischen Seen bewohnt. Ganz auf Nordamerika beschränkt ist auch die Familie der Sireniden mit Siren lacertina und Pseudobranchus striatus, beide in Teichen und Tümpeln der Südoststaaten.

Die überwiegende Mehrzahl der Urodelen gehört zu den Salamandriden. Unsere Fauna besitzt Salamandra maculosa in feuchten Gebirgswäldern, S. atra in den Alpen bis zur Herzegowina, lebendig gebärend. Der iberischen Halbinsel eigentümlich ist Chioglossa, der italienischen Salamandrina, beide mit je einer Art. Am reichsten vertreten ist die Gattung Triton, deren Angehörige einen großen Teil ihres Lebens im Wasser verbringen, zur Ueberwinterung jedoch meist ans Land gehen; bisweilen überwintern die Larven auch im Wasser. Durch den größten Teil von Europa bis nach Westasien verbreitet sind Triton vulgaris und Tr. cristatus; Tr. alpestris bevorzugt kühlere Gewässer, besonders diejenigen der Gebirge und geht in den Alpen bis 2600 m, westeuropäisch ist Tr. palmatus, der bis Mitteldeutschland vordringt. Triton asper bewohnt die iberische Halbinsel, Südspanien und Marokko, Tr. (Pleurodeles) Waltii, Tr. italicus Italien, Tr. Montandonii Südosteuropa bis zu den Karpathen und Mähren, Tr. vittatus den Kaukasus, Kleinasien und Syrien. Ostasiatisch sind Tr. pyrrhogaster, amerikanisch Tr. viridescens und Tr. torosus. Die Gattung Amblystoma findet sich in zahlreichen Arten von Nordamerika (Amblystoma tigrinum) bis Mittelamerika und den nördlichen Anden; am bekanntesten ist A. mexicanum der Axolotl, welcher regelmäßig als kiementragende Larve geschlechtsreif wird. Amblystoma persimile lebt in Siam. Nordamerikanisch sind Plethodon, Batrachoseps, Desmognathus sowie die Höhlenform Typhlotriton, weiter Spelerpes, der südlich bis in die Anden Perus geht und in einer Art (Spelerpes fuscus) auch in Italien vorkommt. Ostasien bewohnen Hybnobius, Onychodactylus, dann Salamandrella, deren Verbreitungsgebiet westlich bis zum Ural reicht.

51. **Anuren.** Unter den schwanzlosen Amphibien umfaßt nur die Unterordnung der Aglossen ständige Wasserbewohner, die durchaus auf die Tropen beschränkt sind. Pipa americana, die Wabenkröte in Guyana und Nordbrasilien trägt die Eier und Jungen in wabenartigen Zellwucherungen des Rückens mit herum. Afrika südlich der Sahara bewohnt der Krallenfrosch Xenopus, dessen Larven lange Barteln tragen wie die Welse, West- und Zentralafrika Hymenochirus.

Im Gegensatz zu den Aglossen sind die Phaneroglossen in zahlreichen Familien über die ganze Erde verbreitet und auch in Europa gut vertreten. Aus der Familie der Discoglossiden gehören zu unserer Fauna die Gattungen Bombinator mit zwei Arten, von denen B. igneus mehr den Norden und Nordosten, B. pachypus mehr den Süden und Südosten bewohnt, dann Alytes, welche von Südwesten her durch das warme Rhein- und Moseltal bis Mitteldeutschland vordringt. Als „Geburtshelferkröte“ bietet Alytes unter allen heimischen Anuren das einzige Beipsiel von Brutpflege, indem das Männchen die abgelegte Laichschnur eine Zeitlang an den Hinterbeinen mit herumträgt; die Larven überwintern vielfach. Amerika besitzt nur die seltene Gattung Ascaphus in den Vereinigten Staaten, bei der der Larvenschwanz persistiert; Liopelma auf Neuseeland ist der einzige Vertreter der Amphibien auf dieser Insel überhaupt. Die Familie der Pelobatiden vertritt bei uns Pelobates fuscus, von Westasien bis nach dem mittleren Frankreich verbreitet; in Südwesteuropa wird er durch Pelobates cultripes ersetzt; die überwinternden Larven erreichen oft eine beträchtliche Größe. Südwesteuropäisch ist Pelodytes, dessen Gebiet bis Ostfrankreich reicht. Tropisch-asiatisch sind Megalophrys und Leptobrachium. Die weiteste Verbreitung unter allen Anuren zeigen die Bufoniden, die nur den Südseeinseln, Neuseeland, Neu-Guinea, Madagaskar fehlen. Die Gattung Bufo besitzt in Europa drei Arten: Bufo vulgaris durch fast ganz Europa, und das gemäßigte Asien bis Japan verbreitet, B. viridis vom Rheingebiet bis Tibet, von Südschweden bis Syrien und Nordafrika, B. calamita in Westeuropa von Portugal bis Riga. Weit zahlreichere Arten weisen die Tropen auf, darunter Riesenformen wie Bufo marinus mit 23 cm Länge, von Südamerika bis Westindien. Auch die Hyliden haben den Schwerpunkt ihrer Verbreitung in den Tropen, wo besonders Süd- und Mittelamerika sowie Australien durch ihren Reichtum an Laubfröschen sich auszeichnen; auch Nordamerika besitzt noch eine ziemliche Anzahl von Arten. Europa dagegen hat nur Hyla arborea, die mit Ausnahme von England und Irland und des größten Teils von Skandinavien und Nordrußland das ganze gemäßigte und südliche Europa bewohnt und in der var. Savignyi über Tibet bis nach China und Japan übergreift. Süd- und Mittelamerika sowie Australien sind die Heimat der Cystignathiden, biologisch ebenso wie viele Hyliden durch mannigfach abgestufte Brutpflege von Interesse. Die meisten sind Baumfrösche; im Wasser leben Calyptocephalus in Südamerika und Pseudis in Guayana mit riesigen, 20 bis 27 cm langen Larven, dann Leptodactylus ebenfalls in Südamerika. Die Familie der Engystomatiden umfaßt tropische Erdfrösche, die sich hauptsächlich von Termiten und Ameisen nähren und nur zur Laichzeit das Wasser aufsuchen. Die Raniden bewohnen den größten Teil von Europa, Asien, Afrika und Nordamerika, Südamerika und Australien fehlen sie fast völlig. Von der Hauptgattung Rana besitzt Europa 7 Vertreter: Rana temporaria durch das ganze mittlere und nördliche Europa sowie Sibirien bis Nordjapan verbreitet, die häufigste und resistenteste Art, die noch in Lappland vorkommt und in den Alpen bis in 2600 m Höhe laicht; R. arvalis, mehr eine Form des Nordens und Ostens, die in der Oberrheinebene ihre Westgrenze erreicht; R. agilis von Süden her bis Mitteldeutschland vordringend, außer der Laichzeit meist in Wäldern; R. esculenta am strengsten an das Wasser gebunden, mehr in den Niederungen und in den Alpen kaum höher als 1100 m gehend, in fast ganz Europa, mit Ausnahme von Irland sowie des größten Teils von England und Skandinavien, weiter als var. ridibunda von Mitteleuropa bis Westasien süd-

lich bis Syrien und Persien, dann in Nordafrika heimisch, die var. chinensis in China, Japan westlich bis Tibet. Südeuropa besitzt noch die unserer Rana temporaria und R. agilis verwandten R. ibera, R. Latastei und R. graeca, letztere beide bis in die Südschweiz vordringend. Zahlreiche weitere Arten leben in den Tropen sowie in Nordamerika, hier besonders die große Rana mugiens der Ochsenfrosch. Arten der baumbewohnenden Ranidengattungen Chiromantis in Afrika, Rhacophorus im tropischen Asien befestigen ähnlich wie die Hylide Phyllomedusa ihren Laich an Blättern von Bäumen und Zweigen, die über das Wasser hängen, von wo dann die ausschlüpfenden Larven durch Regengüsse in ihr eigentliches Element eingespült werden — eine interessante Parallele zu der bereits geschilderten Laichversorgung der Trichoptere Glyphotaelius.

Reptilien.

52. **Chelonier.** Während die Schildkröten in den Gewässern Europas nur eine ganz untergeordnete Rolle spielen, entfalten sie in Nordamerika und dann in den Tropen einen außerordentlichen Reichtum an Gattungen und Arten. Ueberall bevorzugen sie die pflanzenreichen Gewässer der Niederungen und meiden mit verschwindenden Ausnahmen höhere Gebirge. Als Nahrung dienen vor allem Tiere, von den Würmern und Insekten an bis herauf zu den Amphibien und Fischen, die größeren Formen überwältigen selbst Wassergeflügel. Die Eier werden in Gruben am Lande eingescharrt.

In nachstehendem folgen wir der Einteilung Boulengers nach Gadows Darstellung.[1])

A. Cryptodira. Sämtliche Wasser- und Landschildkröten Europas gehören zur Familie der Testudiniden, die mit Ausnahme von Australien und den angrenzenden Inseln über die ganze Erde verbreitet sind. Unsere Fauna besitzt hiervon nur Emys orbicularis, die Südeuropa und einen Teil von Frankreich, Deutschland östlich der Elbe bis nach Westasien sowie Algier bewohnt. Im Diluvium reichte ihr Gebiet bis Schweden und noch im 17. Jahrhundert kam sie auch am Oberrhein vor, wo sie jetzt völlig verschwunden ist. Die Sumpfschildkröte liebt ruhige Gewässer mit reichlichem Pflanzenwuchs, wo sie scheu und verborgen eine mehr nächtliche Lebensweise führt und sich hauptsächlich von Fischen und Fröschen nährt. Die taubeneigroßen Eier werden im Frühling am Ufer abgelegt, wobei in südlicheren Gegenden die Jungen im Ei zu überwintern scheinen. Eine zweite Art der Gattung Emys Blandingi lebt in Nordamerika. Der Südosten Europas bis nach Dalmatien besitzt Clemmys caspia, der Südwesten sowie das gegenüberliegende Afrika die nah verwandte C. leprosa. Weitere Clemmysarten bewohnen Ostasien und Nordamerika. Letzteres Land birgt auch die schöngezeichnete Gattung Chrysemys, die südlich bis Argentinien geht. Indien besitzt in den Gattungen Batagur, Callagur, Kaschuga, Hardella charakteristische Flußschildkröten.

Rein amerikanisch sind die Cinosterniden mit der einzigen Gattung Cinosternum von Kanada bis Guayana, die Chelydriden mit der bissigen Schnappschildkröte Chelydra und Macroclemmys von Kanada bis Mittelamerika; letzteres Land ist auch die Heimat der Dermatemyden mit den Gattungen Dermatemys, Claudius und Staurotypus. Das tropische Südostasien bewohnt das höchst bizarr gestaltete Platysternum megalocephalum als einziger Vertreter der Familie der Platysterniden.

B. Pleurodira. Diese Unterordnung umfaßt drei fast durchweg auf die südliche Hemisphäre beschränkte Familien. Die Pelomedusiden bewohnen Südamerika, Afrika und Madagaskar. Amerikanisch ist die Gattung Podocnemis, zu der eine der häufigsten Schildkröten des Amazonas, Podocnemis expansa, gehört; afrikanisch sind Stenothaerus und Pelomedusa galeata, die von Süd- und Ostafrika nördlich bis zur Sinaihalbinsel vordringt. Von den Chelididen gehören Hydromedusa sowie die über zwei Meter lange Chelys fimbriata Südamerika an, während Chelodina Australien bewohnt. Die auch als eigene Unterordnung aufgefaßten Carettochelydiden sind nur durch eine einzige Gattung und Art Carettochelys insculpta vertreten, die im Fly-River auf Neuguinea lebt und durch ihre zu Flossen ausgebildeten Extremitäten an die Seeschildkröten erinnert.

C. Trionychoidea. Die Weichschildkröten sind über das südliche und südöstliche Asien, das tropische Afrika sowie das atlantische Nordamerika verbreitet. Es sind hauptsächlich Bewohner von Flüssen, die oft sehr beträchtliche Größe — bis fast 2 m Panzerlänge — erreichen und sich von Wassergeflügel, Fischen, Fröschen sowie Mollusken ernähren. Zottenförmige gefäßreiche Anhänge der Schleimhaut der Rachenhöhle vermitteln eine Art von Kiemenatmung und gestatten den Tieren stundenlang unter Wasser zu bleiben. Die artenreichste Gattung ist Trionyx mit Tr. triunguis im tropischen Afrika, im Nil sowie in Syrien und weitere Arten in Indien. Nordamerika besitzt Tr. ferox und Tr. muticus. Tropisch-afrikanisch sind die Gattungen Cycloderma und Cyclanorbis.

53. **Ophidier.** Obwohl fast alle Schlangen schwimmen können, führen doch nur wenige ein wirkliches Wasserleben. In unserer Fauna ist Tropidonotus tessellatus, die Würfelnatter eine ausgesprochene Wasserschlange, die aus ihrer eigentlichen Heimat, den Mittelmeerländern, durch die warmen Täler der Mosel und Nahe bis zum Mittelrhein vorgedrungen ist Sie nährt sich hauptsächlich von Fischen, denen auch unsere Ringelnatter Tropidonotus natrix in ihrem Elemente eifrig nachstellt. Ganz ähnlich wie Tr. tessellatus lebt in Südwesteuropa und Nordwestafrika die Vipernatter Tr. viperinus. Nordamerika besitzt die sehr giftige Wassermokassinschlange Ancistrodon piscivorus. Tropische Süßwasserschlangen sind vor allem die zu den Opistoglyphen gehörigen mehr oder weniger giftigen Homalopsinen, welche in den Gattungen Homalopsis, Cerberus, Hypsirhina, Fordonia usw. von Vorder- und Hinterindien über die Sundainseln bis Australien verbreitet sind. Alle sind vivipar und nähren sich fast ausschließlich von Fischen. Eine ähnliche Verbreitung und Lebensweise zeigt der

[1]) H. Gadow, Amphibia and Reptils. Cambridge Natural History. Vol. VIII 1901.

zu den Aglyphen gehörige Acrochordus javanicus, der bis 3 m lang wird. Von den Boiden ist die riesige Anakonda Eunectus murinus im Stromgebiet des Amazonas sowie in Guayana durchaus an das Wasser gebunden, das sie nur verläßt um sich am Ufer zu sonnen oder ihre Beute zu verzehren.

54. **Crocodilier.** Im Tertiär einst in mehreren Gattungen auch über Europa verbreitet, sind die Krokodile gegenwärtig fast völlig auf die Tropen beschränkt, wo sie Südasien bis Nordaustralien, Afrika südlich der Sahara sowie den Nil, Amerika vom La Plata bis in das südliche Nordamerika bewohnen; nur an einigen Stellen wird dieses Gebiet nordwärts überschritten. Es sind meist gewaltige Tiere, die gerne gesellschaftlich in Flüssen, Seen und Lagunen hausen, bei Tage meist träge am Ufer oder auf Sandbänken ruhend, bei Nacht dem Raube nachgehend. Die großen Eier werden am Ufer eingescharrt, mit Sand oder faulenden Vegetabilien bedeckt und öfter vom Weibchen bewacht. Die periodische Austrocknung der Wohngewässer wird vielfach in lethargischem „Trockenschlaf" überdauert. Die am längsten bekannte Art ist Crocodilus niloticus in Flüssen des tropischen Afrika sowie im Nil, in Aegypten jetzt ausgerottet, aber allem Anschein nach noch in einzelnen Exemplaren in Palästina und zwar im ~~Wadi Zerka, einem Zufluß des Jordans vorhanden~~. Crocodilus cataphractus findet sich besonders in Westafrika vom Senegal bis Kongo. Indien besitzt Cr. palustris und Cr. porosus, letzteres über die Sundainseln bis Nordaustralien verbreitet, Amerika Cr. rhombifer auf Kuba, Cr. americanus von Florida bis Ekuador. Osteolaemus tetraspis ist auf die Flüsse Westafrikas beschränkt. Amerikanisch ist die Gattung Caiman mit mehreren Arten (C. sclerops, C. niger), von Mittelamerika bis zum La Plata verbreitet. Die Gattung Alligator umfaßt zwei Arten: Alligator mississippensis bewohnt das südöstliche Nordamerika bis zum 35° nördlicher Breite, Alligator sinensis den Jangtsekiang in China — ein weiteres Beispiel für den geologischen Zusammenhang der Faunen Nordamerikas und Ostasiens. Von den langschnauzigen fischfressenden Gavialen lebt Gavialis gangeticus in den Flüssen des Festlandes von Indien, Tomistoma Schlegelii auf Sumatra, Borneo sowie auf der Halbinsel Malakka.

55. **Vögel.** Die Zahl der Vögel, welche auf und an dem Wasser leben, ist eine außerordentlich große. Nicht nur Wasser- und Sumpfvögel entnehmen ihre Nahrung den Fluten, auch zahlreiche Landvögel lockt der Insektenreichtum der Gewässer: Schwalben und Segler streichen oft in Scharen über den Spiegel unserer Teiche, Flüsse und Seen und fangen die aufsteigenden Insekten, die Chironomiden und Corethriden, Trichopteren und Ephemeriden in Massen ab. Die hochentwickelte Flugfähigkeit gestattet den Vögeln mühelos weite Räume zu durchmessen und bei drohender Verödung ihrer Brutgebiete, beim Versiegen der Nahrungsquellen durch Eisbedeckung oder Austrocknung der Gewässer günstigere Regionen aufzusuchen. Ungeheure Gebiete werden so bei den jährlichen Wanderflügen durchzogen: der Storch, der sich im Sommer von unseren Fröschen nährt, fordert im Winter seinen Tribut von den Batrachieren Südafrikas; Enten, die im Sommer auf den Tundren am Polarkreis brüten, tummeln sich einige Monate später auf dem oberen Nil, in Ostindien, Australien und auf den Antillen. Noch weiter dehnt sich der Flugbereich mancher Tringa- und Totanusarten des hohen Nordens, deren Südwanderungen bis Chile und Argentinien, Südafrika, Australien und Neuseeland führen. All diese Züge zahlloser Scharen von Sumpf- und Wasservögeln fluten nun schon seit Jahrtausenden Jahr für Jahr vom Pol zum Aequator und wieder zurück zu den heimatlichen Brutplätzen, keineswegs immer in stetig vorwärts drängendem Fluge, der weite Länderstrecken überquert, sondern, besonders im Herbste, in oft unterbrochenem Wandern von Gewässer zu Gewässer, solange als möglich den Flußläufen folgend, die in der Zugrichtung liegen. Daß bei diesen Zugbewegungen zahlreiche Dauerkeime niederer Organismen, unter günstigen Umständen auch Mollusken, Insekten und selbst Fische von einer Raststation zur anderen verschleppt werden können, ist seit langem bekannt und sichert den Wasser- und Sumpfvögeln einen bedeutsamen Anteil an der Ausbreitung der niederen Süßwasserfauna.

Am strengsten an das Wasser gebunden sind von allen Vögeln die Colymbiden mit pelzartig dichtem Gefieder und weit nach hinten gerückten Beinen, höchst unbeholfen auf dem Lande, aber treffliche Schwimmer und noch bessere Taucher, die mit Leichtigkeit 30 bis 40 m unter Wasser in einem Zug durchschwimmen. Von ihnen ist Urinator (Eudytes) als Brutvogel auf den Norden beschränkt, Colymbus (Podiceps) in einer Reihe von Arten über die ganze Erde verbreitet; letztere Gattung baut schwimmende Nester aus faulenden Pflanzenstoffen, deren Gärungswärme die Temperatur des Nestes um mehrere Grade über diejenige der Umgebung erhöhen kann. Schwimmvögel sind die Enten, Gänse, Schwäne und Säger, mit zahlreichen Gattungen in allen Erdteilen, am individuenreichsten aber doch wohl im Norden. Die Schwimmenten, die Gattung Anas im weitesten Sinne, suchen ihre Nahrung im seichten Wasser gründelnd wie die Gänse und Schwäne, während die Tauchenten (Fuligula) zu diesem Zwecke tief unter Wasser tauchen. Dasselbe gilt von den fischfressenden Sägern, Mergus, die oft fern vom Wasser in Baumhöhlen nisten. Die den Sägern verwandte Gattung Merganetta bewohnt in mehreren Arten ausschließlich die reißenden Bergwasser der Anden von Columbia bis Chile, wo die tauchgewandten Vögel sich selbst in die Strudel der Wasserfälle stürzen. Ganz ähnliche Aufenthaltsorte wählt Hymenolaimus malacorhynchus auf Neuseeland. Ungeheure Mengen von Fischen vertilgen die nur in wärmeren Gebieten brütenden Pelikane sowie die weit verbreiteten Kormorane, beide sowohl dem Meere als dem Süßwasser angehörend. Fischfresser sind auch die tropischen Schlangenhalsvögel, von denen Plotus Levaillantii bis nach Syrien geht; weiter die Lariden, die Möwen und Seeschwalben, die in den Hauptgattungen Larus und Sterna auch die Gewässer des Binnenlandes, Seen, Flüsse und Sümpfe bewohnen und hier gern zu Kolonien vereint brüten, bisweilen in solchen Mengen,

daß ihre Exkremente das Wasser förmlich düngen.

Sumpfvögel tropischer und gemäßigter Gebiete sind vor allem die Ardeiden, in Europa durch die Gattungen Ardea, Nycticorax, Botaurus und Ardetta vertreten, deren Bestand indessen durch Trockenlegung der Sümpfe und schonungslose Verfolgung sehr beträchtlich zurückgegangen ist; zahlreiche und oft prächtig gefärbte Arten leben in den Tropen, darunter recht absonderliche Vogelgestalten wie Balaniceps in Afrika. Wärmere Gebiete bevorzugen auch die Ciconiiden mit Ciconia ciconia und C. nigra in Europa, die Ibiden, von denen Plegadis falcinellus im Süden und Osten Europas, Platalea leucorodia außerdem auch in Holland brütet, sowie die Flamingos (Phoenicopterus) am Süß- und Brackwasser. Die Gruiden lieben offenes Gelände und sind am artenreichsten in Ostasien; Brutvögel Europas sind nur Grus grus jetzt nur mehr in Nordosten, Grus virgo im Südosten. Von den Ralliden geht Fulica auch auf die offenen Wasserflächen, während die südliche Gattung Porphyrio sowie unsere heimischen Arten von Rallus, Gallinula und Ortygometra mehr versteckt im Sumpfdickicht hausen. Ganz auf die Tropen beschränkt sind die Familien der Eurypygiden und Heliornithiden. Die Charadriiden und Scolopaciden erreichen ihre größte Individuenmenge im Norden, deren Tundren und Moore, Sümpfe, Flüsse und Seen die Hauptbrutplätze der Gattungen Charadrius, Vanellus, Tringa, Limicola, Totanus, Numenius, Limosa, Phalaropus, Gallinago bergen. Im Herbste südwärts ziehend, beleben zahlreiche dieser Sumpf- und Wasserläufer, Schnepfen und Regenpfeifer die Ufer unserer mehr und mehr verödenden Gewässer. Tropisch ist die kleine Familie der Parriden (Parra), die mit ihren außerordentlich verlängerten Zehen leichtfüßig über die Schwimmblätter der Wasserpflanzen schreiten.

Mit den Schwimm- und Sumpfvögeln ist die Ornis der Gewässer noch keineswegs erschöpft: auch zahlreiche andere Vögel brüten am Wasser und nähren sich von seinen Bewohnern. Hierher gehören vor allem die Alcediden, am reichsten und farbenprächtigsten in den Tropen der alten Welt, besonders in Papuasien entwickelt, in Europa nur mit Alcedo ispida als Brutvogel. Rohrvögel sind die einfach gefärbten weit verbreiteten Rohrsänger die Acrocephalus-Arten und Locustella luscinioides, von Meisen Panurus biarmicus die Bartmeise, jetzt mit Ausnahme einiger Brutkolonien in Holland und England fast ganz auf den Osten und Süden Europas sowie das gemäßigte Asien beschränkt; Sümpfe mit Rohr und Weidengebüsch liebt die Beutelmeise Remizus pendulinus von ähnlicher Verbreitung wie Panurus, aber Nordwesteuropa fehlend, dann unser Rohrammer Emberiza schoeniclus. Von Bachstelzen brütet Budytes flavus auf Sumpfwiesen, Motacilla boarula an raschfließenden Bächen, besonders der Gebirge, hier oft in Gesellschaft des Wasserschmätzers Cinclus merula, der nahrungsuchend unter Wasser taucht. Riparia riparia gräbt ihre Neströhren in steile Uferwände. Raubvögel, die sich hauptsächlich von Fischen nähren, sind Pandion haliaetos der Fischadler, fast über die ganze Erde verbreitet, Haliaetos albicilla der Seeadler, an den Küsten des Nordens sowie an den Seen und Strömen des Binnenlands wie beispielsweise an der Donau brütend; weitere Arten leben in Nordamerika, Afrika, Asien bis Australien. Auch Milvus korschun der schwarzbraune Milan lebt teilweise von Fischen, während Circus aeruginosus der Rohrweih das Wassergeflügel und besonders dessen Eier dezimiert. Die Gruppe der Fischeulen Ketupa ist auf das tropische Asien beschränkt. Nahrungsspezialist ist der zu den Falconiden gehörige Rosthramus sociabilis, von Florida und Kuba bis Argentinien verbreitet: er lebt fast ausschließlich von Süßwasserschnecken der Gattung Ampullaria, die er mit seinem schlanken an der Spitze stark hakenförmig gekrümmten Schnabel aus ihren Gehäusen zieht.

56. **Säugetiere.** Unter den Säugetieren zeigen die Cetaceen, die Sirenen, dann die Pinnipedier die weitgehendsten Anpassungen an das Leben im Wasser. Alle diese Ordnungen haben ihre eigentliche Heimat im Meere, entsenden aber auch Vertreter in das Süßwasser. Von den Cetaceen steigen Delphiniden oft weit in die größeren Flüsse auf, aus den nordischen Meeren besonders Phocaena phocaena, seltener Phocaena orca. In der Elbe sind diese Tiere bis oberhalb Magdeburg beobachtet worden, in der Themse bis Greenwich, in der Seine bis Paris; im Rhein drang 1688 eine Phocaena über 900 km weit bis gegen Basel vor und strandete beim Rückzug in der Gegend von Köln. Delphinapterus (Beluga) leucas der Weißwal folgt den Lachsen oft weit in die Flüsse Sibiriens.

Wirkliche Flußdelphine sind die Platanistiden, die sich vorherrschend von Fischen nähren. Hierher gehören Platanista gangetica, bis 3 m lang, im Stromgebiet des Ganges und des Indus, Inia geoffroyensis, Sotalia pallida, Stenodelphis Blainvillei, der kleinste Delphin überhaupt, im Amazonas, die beiden letzteren auch im La Plata. Afrika besitzt Sotalia Teuszii im Kamerunfluß. Die pflanzenfressenden Sirenen oder Seekühe bewohnen die Tangwiesen tropischer Meeresküsten sowie die einmündenden Flüsse oft sehr weit hinauf, wie Manatus sengalensis im Senegal, Niger und Tschadsee, Manatus inunguis in den Flüssen des tropischen Amerika. Im Gegensatz zu den Cetaceen und Sirenen, die kaum jemals das feuchte Element freiwillig verlassen, verbringen die Pinnipedier, alle Bewohner der kühleren Meere, einen großen Teil ihres Lebens auf dem Strande; auch die Jungen werden hier gesetzt. Manche Robben dringen auch ziemlich weit in die Flüsse ein; ein ständiger Bewohner des Süßwassers ist Phoca (Calocephalus) baicalensis im Baikalsee.

Auch die Gewässer des Binnenlandes bieten zahlreichen Säugern Aufenthalt, Jagd- und Weidegründe sowie Zuflucht bei drohenden Gefahren. Viele der hierher gehörigen Formen sind mit Schwimmhäuten versehen und schwimmen und tauchen ausgezeichnet; alle wechseln regelmäßig auf das Trockne. Von den Monotremen lebt Ornithorhynchus anatinus das Schnabeltier in und an den Flüssen von Ost- und Südaustralien sowie auf Tasmanien, wo es sich haupt-

sächlich von Schnecken und Muscheln nährt, die es mit Hilfe seines Hornschnabels zerquetscht; die weichhäutigen Eier werden in Uferhöhlen abgelegt. Von den Beuteltieren hat sich nur der mit Schwimmhäuten an den Hinterfüßen versehene Chironectes minimus dem Wasserleben angepaßt; er lebt in Gewässern von Zentral- und Südamerika und stellt besonders den Fischen nach. Nicht unbeträchtlich ist die Zahl aquatiler Insektivoren. In unserer Fauna gehört nur Neomys (Crossopus) fodiens, die Wasserspitzmaus hierher, mit Schwimmhaaren zwischen den Zehen, ein trotz seiner Kleinheit äußerst räuberisches und gefräßiges Tier; Südfrankreich und Nordspanien besitzen Myogale pyrenaica Südosteuropa speziell das Flußgebiet des Don und der Wolga Myogale moschata, die sich bis Zentralasien verbreitet im Diluvium aber westlich bis England vorkam. Nordamerikanisch ist Scalops aquaticus der Wassermull mit Schwimmhäuten zwischen den Hinterzehen. Potamogale velox ist auf Gebirgsgewässer Westafrikas, Limnogale mergulus auf Madagaskar beschränkt. Unter den Carnivoren umfaßt die Familie der Lutriden äußerst schwimm- und tauchgewandte Tiere, die sich hauptsächlich von Fischen nähren. Lutra lutra, unser Fischotter, über den größten Teil Europas und des außertropischen Asiens verbreitet, bewohnt stehende und fließende Gewässer von den Niederungen bis hoch in die Alpen hinauf, allenthalben stark verfolgt und in dichter besiedelten Ländern nur durch seine scheue und unstäte Lebensweise vor völliger Ausrottung bewahrt. Die große Lutra brasiliensis fischt gesellschaftlich. Aus der Familie der Musteliden ist der durchaus an das Wasser gebundene Nörz Lutreola lutreola in Deutschland fast ganz verschwunden; er findet sich nur noch in einzelnen schwer zugänglichen Sumpfgebieten Norddeutschlands, wo er sich neben Fischen besonders von Krebsen nährt; etwas häufiger ist das Tier noch in Süd- und Ostfrankreich, dann in Rußland und Finland. Nordamerika besitzt die nah verwandte Lutreola vison.

Die Ordnung der Nagetiere enthält ebenfalls eine Anzahl wasserliebender Formen. Hierher gehört vor allem die Familie der Castoriden mit der einzigen Gattung Castor und zwei Arten Castor fiber in Europa und Sibirien, C. canadensis in Nordamerika. Beide sind in ihrem Bestande sehr zurückgegangen. Noch im Mittelalter bewohnte der Biber zahlreiche Flüsse Europas und baute seinen Burgen in den stillen Wassern der Auwälder; heute ist er in Deutschland bis auf eine Kolonie an der Elbe zwischen Wittenberg und Magdeburg völlig ausgerottet; weitere Reste leben im Gebiet der Rhonemündung, dann im südlichen Norwegen. Von Muriden ist die Wanderratte Epimys norvegicus (Mus decumanus) auch fern von menschlichen Siedelungen an Wasserläufen heimisch geworden und vielerorts häufiger als die eigentliche Wasserratte Arvicola amphibius. Nordamerika besitzt die Gattung Fiber, die ähnlich wie der Biber lebt, aber sich auch von Muscheln nährt, dann Neofiber, Südamerika den stattlichen Myopotamus, Australien Hydromys. Der größte Nager, Hydrochoerus capybara bewohnt gesellschaftlich die pflanzenreichen Flüsse, Altwasser und Sümpfe des tropischen Südamerika. Von den Huftieren ist das riesige Flußpferd Hippopotamus amphibius durchaus an den Wasser gebunden: noch in historischer Zeit bis in das Nildelta verbreitet, ist es jetzt auf die Flüsse und Seen des tropischen Afrika zurückgedrängt. Eine zweite viel kleinere Art Hippopotamus (Choeropsis) liberiensis scheint auf Liberia beschränkt zu sein.

Wasserfledermäuse, die über dem Spiegel von stehenden und fließenden Gewässern nach Insekten jagen, sind in unseren Breiten hauptsächlich Leuconoe Daubentonii und L. dasycneme, seltener L. mystacina, alle mehr Bewohner der Niederungen. Auch Vesperugo noctula kreist vielfach noch bei Sonnenschein in raschem Fluge hoch über den Wassern.

IV. Die Lebensbezirke des Süßwassers.

Das Süßwasser bietet seinen Bewohnern die verschiedensten Existenzbedingungen. Fließendes und stehendes Wasser, Boden- und freies Wasser schaffen die großen Gegensätze, welche die Gruppen der rheophilen und limnophilen, der pedonischen und planktonischen Organismen scheiden; Verschiedenheiten der Temperatur, des Lichtgenusses, der chemischen Beschaffenheit des Mediums, weiter Wechsel des Untergrundes und der Pflanzenwelt bewirken überall weitere Gliederung. So verteilt sich die Tierwelt auf verschiedene Lebensbezirke, in denen dieselben Anforderungen an die Umwelt sehr verschiedenartige Organismen zusammenhalten und ihren Anpassungen an die besonderen Existenzbedingungen des Wohnorts trotz aller Verschiedenheiten in der Wahl der Mittel dennoch gleiche Richtung und gleiches Gepräge verleihen.

A. Die Lebensbezirke der rheophilen Tierwelt.

Quelle, Bach, Fluß und Strom umspannen den Lebensbereich der rheophilen Tierwelt, ihr Medium ist das stets bewegte, immer in gleicher Richtung abwärts strömende, ständig sich erneuernde Wasser. Die Stärke der Wasserbewegung, der einseitige Druck, gegen den die Tierwelt unserer fließenden Gewässer sich behaupten muß, wechselt dabei außerordentlich: vom Sturz und Prall des Wasserfalls bis zu dem kaum merkbaren Gleiten des Stromes, der im weitgeschwungenen Bogen die Niederungen durchzieht, gibt es alle Uebergänge.

1. Die Quelle. Die typischsten Quellen finden sich im Berglande, wo das Wasser in sprudelndem Fall den Spalten des Gesteins entspringt. Dies sind die sogenannten Rheokrenen, im Gegensatz zu den Limnokrenen, den mehr oder weniger stagnierenden Quelltümpeln im Schwemmland der Niede-

rungen. Charakteristisch für die Rheokrenen ist ihre gleichmäßige kühle Temperatur, ihre Klarheit und Reinheit, ganz besonders ihr fast völliger Mangel an organischer Substanz. Sehr wechselnd ist dagegen der Gehalt an gelösten mineralischen Bestandteilen, wie ihn der geologische Untergrund bedingt; biologisch von Bedeutung ist besonders der jeweilige Kalkgehalt. Zur eigentlichen Quellfauna gehören zunächst eine Anzahl mehr oder weniger subterran lebender Tiere, die das Wasser immer wieder aus dem Schoß der Erde an das Tageslicht spült. Hierher zählen die zarten Quellschnecken der Kalkgebirge, die Lartetien oder Vitrellen, die Crustaceen Niphargus und Asellus cavaticus, die Planarie Dendrocoelum infernale, alle blind. Weitere Quellbewohner sind eine ganze Reihe von Turbellarien wie Planaria alpina, Planaria montenegrina, Dendrocoelum Mrazekii, Polycladodes alba, Polycelis cornuta, Prorhynchus fontinalis, die Bythinellen unter den Schnecken, einige Hydracariden wie Protzia squamosa, Partnunia-, Sperchon- und Lebertia-Arten, weiter Trichopteren-Larven von Crunoecia irrorata, Adicella, Ptilocolepus, Fliegenlarven wie Pedicia usw. — alles stenotherme psychrophile Tiere, die fast durchweg auch die an die Quelle sich anschließenden obersten Strecken der Bergbäche besiedeln.

2. Der Bergbach. Die Gletscherbäche der Hochgebirge, im Sommer mächtig anschwellend, im Winter fast versiegend, immer eisig kalt, sind an ihren Anfängen äußerst arm an Tieren: nur vereinzelte Larven von Simulien und Ephemeriden führen an den wirr durcheinander geworfenen Trümmer- und Geschiebeblöcken ein kümmerliches Dasein. Anders die Bäche der tieferen Alpenregionen und der Mittelgebirge. Aus Wäldern und Wiesen sammeln sich hier die Rinnsale der Quellen zum Bach: schäumend stürzt er über Klippen und Felsen, beruhigt sich in tiefen Kolken und strömt weiter über Blöcke, Geröll, Kiesel und blanken Sand. Pflanzen siedeln sich am Ufer und im Wasser an: wenig Phanerogamen, dafür zahlreiche Moose, die in flutenden Büschen und dichten Polstern die Steine überkleiden, dazu zahlreiche Algen, in oft sehr üppigen Beständen. Das Wasser ist klar und rein, mit Sauerstoff gesättigt, und bewahrt Sommer und Winter eine gleichmäßige kühle Temperatur.

Die Tierwelt, welche diese Bergbäche bewohnt, muß vor allem imstande sein, dem oft recht beträchtlichen einseitigen Druck des strömenden und stürzenden Wassers zu trotzen. Das wird mit sehr verschiedenen Mitteln erreicht. Bei unseren Fischen genügt hierzu vielfach die bloße Muskelkraft: Forellen, Lachse und Saiblinge vermögen sich auch in stärker bewegtem Wasser längere Zeit gegen die Strömung im Gleichgewicht zu halten; außerdem haben diese Salmoniden alle ihre Stand- und Zufluchtsplätze hinter Felsen, Baumwurzeln, in Kolken und Uferhöhlungen. Von den übrigen Fischen unserer Bergbäche leben Cottus gobio und Nematochilus barbatula unter und zwischen Steinen, welche die Gewalt der Strömung brechen. Steinbeschwerung der Gehäuse gewisser Trichopterenlarven, besonders derjenigen der Gattungen Silo und Goera dient möglicherweise auch dazu, den Widerstand gegen den Wasserdruck zu erhöhen. Zahlreichen Kleintieren bieten die Moosrasen Schutz und Halt gegen die Strömung: hier hausen Larven von Perliden, Trichopteren (Micrasema, Ptilocolepus), Chironomiden und Psychodiden (Pericoma), dann vor allem die Bach-Hydracarinen und Käfer der Helmiden, die sich mit kräftigen Klauen an die Moosstengel klammern.

Weitgehender Sicherungen gegen die Gewalt der Strömung bedürfen die an den Steinen lebenden Tiere. Einen gewissen Schutz gewährt schon die Unterseite der Steine, wo der Anprall des Wassers mehr oder weniger abgeschwächt ist; hier entfaltet sich auch immer das reichste Leben. Zahlreiche dieser lithophilen Tiere zeigen eine beträchtliche Abflachung des Körpers, die der Strömung nur eine sehr geringe Angriffsfläche bietet und auch ein Einzwängen in enge Spalträume ermöglicht. Beispiele hierfür bieten die Larven der Ephemeriden (Baetis, Ecdyurus), sowie einiger Perliden (Perla), weiter die asselförmigen Larven der Helmiden, die sich fest den Vertiefungen des Gesteins anpressen. Auch die Ancylusartige Larve der Trichoptere Thremma gallicum ist nur schwer von ihrer Unterlage loszulösen. Verstärkt wird der Schutz durch zeitweise oder dauernde Fixierung an das Substrat. Die Larven der Blepharoceriden (Liponeura, Curupira) haften mit ihren Saugnäpfen so fest an den Felsblöcken, daß auch die reißendste Strömung sie nicht abzuspülen vermag; ähnliches gilt von der Schnecke Ancylus fluviatilis und verwandten Formen. Die Turbellarien unterstützen die Adhäsion ihres flachen schmiegsamen Körpers zweitweise durch Schleimabsonderungen; die Larven der Simulien und einiger Chironomiden, weiter diejenigen von Trichopteren (Hydropsyche) verankern sich durch Gespinnstfäden, Philopotamus und Polycentropus leben in Gespinnstsäcken, die auch die zutreibende Nahrung auffangen. Dauernde

Fixierung zeigen die Wohnröhren vieler Chironomiden und einiger Trichopteren (Tinodes); gestielte festsitzende Gehäuse besitzt unter den Chironomiden die Larve einer Tanytarsus-Art; unter den Trichopteren ist der Köcher von Rhyacopsyche Hageni in Bergbächen Brasiliens durch einen seilartigen Stiel am Gestein verankert.

Zeitweise Fixation als Anpassung an das Leben in reißenden Gewässern zeigen auch manche tropische Fische. Die den Welsen nahestehenden Loricariiden saugen sich mit den verdickten Lippen ihres unterständigen Mundes an Steinen der Gebirgsbäche Südamerikas fest; ähnlich leben allem Anschein nach die Siluriden Exostoma in Indien, Euchilichthys in Afrika. Bei Pseudecheneis, einem kleinen Wels der Bergwasser des Himalaya, sowie Gastromyzon, einem Cypriniden in Nordborneo, ist die Bauchfläche zwischen den horizontal abstehenden paarigen Flossen stark verbreitert und zu einem förmlichen Haftorgan umgewandelt.

Je weiter der Bach zu Tal eilt, desto geringer wird sein Gefälle, der Lauf wird ruhiger und windungsreicher, Kies und Sand gewinnen mehr und mehr an Ausdehnung; neben den Moosen treten höhere Wasserpflanzen immer häufiger auf und dichte Bestände von Callitriche, Potamogeton, Batrachium erfüllen das Bachbett. Alle diese Veränderungen haben auch einen entsprechenden Wandel der Fauna zur Folge: zur Forelle gesellt sich bei uns die Aesche (Thymallus thymallus) als Charakterfisch hinzu, die stenothermen Kaltwasserformen treten zurück und werden mit steigender Erwärmung des Wassers mehr und mehr von eurythermen Formen abgelöst.

3. Fluß und Strom. Wie das Rinnsal der Quelle in den Bach, so geht auch dieser selbst wieder in den Fluß und schließlich in den Strom über. Beide charakterisiert neben der Abnahme des Gefälles zunächst die größere Breite und Tiefe, bedingt durch die stärkere Wasserführung, die im einzelnen mannigfachen Schwankungen unterliegt: Flüsse aus Mittelgebirgen zeigen die größte Wasserfülle meist im Vorfrühling, wenn der Schnee schmilzt, Flüsse aus Hochgebirgen im Hochsommer, zur Zeit des stärksten Abschmelzens der Gletscher und Firnfelder. In den Tropen läßt die Regenzeit die Flüsse mächtig anschwellen, während die Trockenheit manchen Flußschlauch in eine Reihe stagnierender Tümpel auflöst, in denen sich dann fast die ganze Fauna auf engstem Raum zusammendrängt. Die Temperatur der Flüsse ist nicht die gleichmäßige der quellnahen Bergbäche, sondern wechselt mit der Jahreszeit innerhalb weiter Grenzen. Nur bei niederen Pegelständen erscheint das Flußwasser klar: jedes Hochwasser bringt starke Trübung und führt gewaltige Mengen von suspendiertem Schlick und Feinsand zu Tal, untermischt mit zahlreichen losgerissenen und aus der Umgebung eingeschwemmten Tieren und Pflanzen, die so oft weithin verfrachtet werden.

Im Laufe stromab wechselt die Beschaffenheit der Ufer und der Sohle unserer Flüsse und damit auch der Charakter ihrer pedonischen Tierwelt. Anstehende Felsen, Steine und grobes Geröll, oft dicht mit Moosen und Algen bedeckt, finden sich in größerer Ausdehnung fast nur im Bereich der Gebirge. In der Ebene gewinnen durch die fortschreitende Zertrümmerung des Geschiebes Kies und Sand immer mehr an Ausdehnung; an ruhigen Stellen lagert sich Schlick ab, der namentlich im trägen Unterlauf der Ströme weite Strecken bedeckt. Die lithophile Tierwelt der Flüsse ist eine recht reiche; sie erinnert in ihren Anpassungen vielfach an die entsprechende Lebensgemeinschaft des Bergbaches, mit der sie manche Gattungen gemein hat. Die Korrektion unserer Flüsse, die Festlegung der Uferböschungen mit Steinblöcken, hat ihren Wohnbereich stromabwärts beträchtlich erweitert und vielen Formen die Ansiedelung auch im Flachland ermöglicht. Zum Bestand dieser lithophilen Flußfauna gehören hauptsächlich Spongillen, Bryozoen, dendrocoele Turbellarien, besonders Planaria gonocephala, Hirudineen, einige Oligochaeten, dann zahlreiche Larven von Insekten, besonders Ephemeriden (Baetis, Oligoneuria, Ecdyurus, Prosopistoma), Perliden (Perla, Isogenus, Dictyopteryx, Isopteryx), Trichopteren (Hydropsyche, Brachycentrus, Leptocerus, Glossosoma, Ithytrichia), Chironomiden, deren sandinkrustierte Wohnröhren oft dicht gedrängt die Steine überziehen; weiter Helmiden als Käfer und Larven sowie die Wasserwanze Aphelocheirus aestivalis. Von Crustaceen sind Gammarus pulex und G. fluviatilis häufig, von Mollusken Ancylus fluviatilis, Neritina fluviatilis sowie Dreyssensia polymorpha. Sehr arm an Tieren ist allenthalben der labile Kies, etwas reicher der Sand, den Unionen, Sphaerien und Pisidien durchpflügen; auch Oligochaeten sind hier oft häufig, ebenso die Larven von Ephemera sowie die Ammocoetes-Stadien der Petromyzonten. Die Oberfläche des Schlickes überzieht an stillen Stellen oft weithin ein bräunlicher Filz von Diatomeen und Oscillarien, zwischen denen sich eine sehr art- und individuenreiche Kleinfauna von Protozoen, Rotatorien, Würmern und Crustaceen entwickelt. Sonst ist dieser Schlicksand der Aufenthalt zahlreicher Oligo-

chaeten, Larven von Chironomiden, Ephemeriden der Gattungen Palingenia und Polymitarcys, die hier ihre Gänge graben. Ihre Individuenmenge ist an manchen Orten eine so ungeheuere, daß die in lauen Hochsommernächten den Fluten entsteigenden Eintagsfliegen einem Schneegestöber gleich über den Spiegel der Flüsse dahinwirbeln. Den Fischen dienen diese Schlickflächen mit ihrem Reichtum an Insektenlarven und Gewürm als ergiebige Weidegründe. Größere Bestände phanerogamer Pflanzen finden sich nur in Flüssen ohne stärkere Geschiebeführung und auch hier vielfach nur lokal: bei uns in rascher fließendem Wasser vor allem die langflutenden Büsche mehrerer Potamogeton-Arten, Batrachium fluitans, Sparaganium, Myriophyllum; in trägeren Gewässern mit Schlammgrund die Rasen von Elodea, Hippuris, Hottonia, Ceratophyllum, Nuphar usw., alle meist reich besiedelt mit Infusorien, Hydren, Rotatorien, Naiden, zahlreichen Schnecken (Limnaeus, Amphipeplea, Planorbis, Physa, Valvata, Paludina) und den verschiedensten Insekten. Ungeheuere Ueppigkeit erlangt die Vegetation in manchen Strömen der Tropen, wo wie im weißen Nil die ungehemmt wuchernden Pflanzenmassen das Wasser stauen und weiten Strecken des Flußlaufes das Gepräge von Riesensümpfen verleihen.

Wasserfälle und Stromschnellen, die bisweilen den ruhigen Lauf der Flüsse unterbrechen, haben in unseren Breiten keine ihnen eigentümlichen Tierformen aufzuweisen, während in den Tropen die festsitzenden austernartigen Aetherien für die Stromschnellen afrikanischer Flüsse, die Byssanodonten für diejenigen Südamerikas charakteristisch sind. Tiergeographisch bilden Wasserfälle bisweilen die Schranken, welche den stromaufwärts gerichteten Wanderungen der Fische ein Ziel setzen. So fanden im Rhein früher die Laichzüge der Maifische (Alosa alosa) ihr Ende bei den Stromschnellen von Laufenburg; der sprunggewaltige Lachs überwand auch dieses Hindernis und machte erst Halt vor dem schroffen Absturz des Rheinfalls. Planktonorganismen, die der Rhein dem Bodensee entführt, sowie Tiere des Flusses selbst, passieren den Fall vielfach ohne Schaden zu nehmen, unter ihnen selbst so zarte Formen wie Infusorien, Rädertiere und Daphniden; auch Fische gelangen bisweilen herab.

Der Lebensbereich der Flüsse erstreckt sich aber nicht nur auf die von dem rinnenden Wasser benetzte Fläche. Jedes größere Hochwasser überflutet weithin die angrenzenden Niederungen, füllt ausgetrocknete Tümpel, Teiche und Lachen, weckt die dort schlummernden Dauereier, Cysten und sonstigen Ruhezustände zu kurzem Leben und führt immer wieder neue Tierformen zu. Weiter wechseln Flüsse, die sich noch selbst überlassen sind, im Schwemmland der Ebenen öfter ihren Lauf: ihr Bett zerfasert sich in zahlreiche Nebenrinnen, weitausholende Windungen werden durchbrochen und in Altwasser verwandelt. Einmal aus dem eigentlichen Stromlauf ausgeschaltet, fallen diese Altwasser allmählich der Verlandnung anheim: Hochwasser lagern ihre Kies-, Sand- und Schlickmassen in ihnen ab, und verschließen damit bald den oberen Zugang zum Strome, Wasser- und Sumpfpflanzen breiten sich aus und mit ihnen nimmt auch die Tierwelt des ruhigen Wassers Besitz von dem neugewonnenen Gebiete, das sich mehr und mehr mit vielgestaltigem Leben füllt. Solange die Verbindung mit dem offenen Strom nicht völlig unterbrochen ist, wechseln die Flußfische namentlich bei Hochfluten gerne in die schützenden Buchten, wo sie stets reichliche Nahrung und manche von ihnen auch passende Laichstätten finden; umgekehrt gelangen von hier aus bei fallendem Wasser zahlreiche frei schwebende und frei schwimmende Organismen in den Strom, wo sie als Potamoplankton dem Meere zutreiben.

Bei allen durch die wechselnde physische Beschaffenheit der einzelnen Flußstrecken bedingten Verschiedenheiten zeigt die Tierwelt eines jeden größeren Stromsystems auch eine Reihe gemeinsamer Züge in Gestalt charakteristischer Leitformen, deren Vorkommen oder Fehlen die verschiedene hydrographische Entwickelung und wechselnde geologische Geschichte der einzelnen Ströme wiederspiegelt. So besitzt der Rhein den Lachs, den Aal, Alosa vulgaris, Gasterosteus aculeatus, die Donau den Huchen, die Gattung Aspro, Acerina schraetser, verschiedene Acipenser-Arten wie A. ruthenus usw. Aehnliche Leitformen finden sich auch unter den Mollusken. Sehr große Ströme bewahren ihre Charakterformen selbst durch verschiedene tiergeographische Regionen hindurch, so vor allem der Nil, welcher in seinen Fischen und Mollusken zahlreiche tropische Elemente weit in das mediterrane Gebiet hineinträgt.

B. Die Lebensbezirke der limnophilen Tierwelt.

Aus Bächen sammelt sich der Fluß, aus Flüssen erwächst der Strom und in ununterbrochenem Zusammenhang dehnt sich so der Bereich der rheophilen Lebewelt vom Meer bis zu den fernsten Quellen. Anders die stehenden Gewässer, die Wohnstätten

der limnophilen Organismen. See, Teich, Tümpel, Sumpf und Moor — sie alle sind mehr oder weniger geschlossene Becken, jedes eine umgrenzte Welt für sich, die sich selbst genügt und selbst im biologischen Gleichgewicht hält. Und während in Bach und Fluß die Tier- und Pflanzenwelt nur im Bereich des Bodens sich zu entfalten und dauernd zu halten vermag, das stetig enteilende Wasser jedoch selbst kein ihm eigentümliches Leben erzeugt, ermöglicht die Ruhe der stehenden Gewässer auch eine Besiedelung der bodenfernen Wassermassen, wo die zarten Formen des Planktons schwebend und schwimmend die Fluten mit reichem Leben füllen.

1. Der See. Von allen Gewässern des Binnenlandes vereinigt der See die verschiedenartigsten Lebensgemeinschaften. Wie im Meere kommen hier drei große natürliche Regionen zur Ausbildung: 1. die Uferregion, die bis etwa 10 bis 30 m Tiefe saumförmig den See umzieht. 2. Die Tiefenregion, welche den ganzen übrigen Teil des Seebodens umfaßt und 3. die Region des freien Wassers.

1a) Uferregion. Die Ufer- oder litorale Region ist am wenigsten scharf umschrieben und zeigt oft an ein und demselben See sehr wechselnde Existenzbedingungen. Hohe Wasserstände verwischen die Grenze gegen das Land, niedere legen große Strecken trocken. Wellen und Strömungen schaffen fast ständige Bewegung. Die Temperatur schwankt im Laufe eines Jahres innerhalb weiter Grenzen. Der Boden besteht bald aus anstehendem Fels, bald aus Geröll, Sand, Schlamm oder Schlick. Wo es der Untergrund und die Brandung gestattet, faßt die Vegetation festen Fuß: zunächst dem Ufer die Bestände hochhalmiger Gramineen und Cyperaceen (Phragmites, Scirpus, Glyceria, Cladium, Carex) mit zahlreichen Sumpfgewächsen; daran anschließend seewärts ein Gürtel von Schwimmpflanzen, besonders Potamogeton-Arten und Nymphaeen, die mit zunehmender Tiefe mehr und mehr von grundständigen Pflanzen abgelöst werden, unter denen namentlich die Rasen der kalkreichen Characeen eine beträchtliche Ausdehnung gewinnen; sie gehen in geschlossenem Bestande 25 bis 30 m tief und ihr Verschwinden bezeichnet in zahlreichen Seen die untere Grenze der litoralen Region. Im Bereich dieser Pflanzenbestände entfaltet die lakustre Fauna ihre größte Mannigfaltigkeit. Die überwiegende Mehrzahl der hier vorkommenden Tiere, so vor allem das ganze Heer der Protozoen und Rotatorien, weiter die meisten Würmer, Insekten und Crustaceen finden sich auch in kleineren Gewässern, in Altwassern und Teichen; charakteristische Seeformen sind unter den Fischen gewisse Coregonen, unter den Mollusken einige dickschalige und gedrungene Varietäten der Gattung Limnaeus. Beträchtlich ärmer an Arten ist die Tierwelt des Sandgrundes. Am individuenreichsten sind noch gewisse Oligochaeten (Psammoryctes), Amphipoden (Gammarus pulex), Insektenlarven, wie diejenigen von Ephemera vulgata, die hier ihre Gänge graben, weiter die von Molanna angustata, die ihre schildförmigen Köcher aus Sandkörnchen und Fragmenten von Schneckenschalen aufbauen und beim Kriechen über den Sand in diesem eigentümliche Spuren hinterlassen. Von Wasserwanzen tummeln sich hier die Scharen der kleinen Micronecta minutissima. Mollusken sind durch Unionen, Anodonten, Sphaerien und Pisidien vertreten. Eine eigene Fauna besitzen die Steine und Gerölle der offenen Brandungsufer, wo das bewegte sauerstoffreiche Wasser auch sonst rheophilen Tieren zusagenden Existenzbedingungen bietet. An glatten Steinen konzentriert sich das Leben hauptsächlich auf die Unterseite: hier sitzen Spongillen und Bryozoen in flachen Krusten, weiter Hirudineen (Glossosiphonia, Herpobdella), Turbellarien wie Dendrocoelum lacteum, D. punctatum, Polycelis nigra auch in einer lehmgelben Varietät, in Alpenseen Planaria alpina. Von Crustaceen ist Gammarus pulex häufig; die Insekten sind wie in den Bächen hauptsächlich durch Helmiden sowie die stark abgeplatteten breiten Larven von Ephemeriden (Ecdyurus, Heptagenia) vertreten; von Trichopteren baut auch hier Polycentropus seine Gespinnstsäcke, Tinodes ihre sandinkrustierten Gänge an den Seiten der Steine. Wo wie in den baltischen und subalpinen Seen kalkspeichernde Algen wie Rivularia, Schizothrix fasciculata usw. die Oberfläche der Steine mit höckeriglöcherigen Krusten überziehen, bieten diese zahlreichen Tieren Schutz gegen die Brandung und vielfach auch Nahrung. Von Trichopterenlarven leben hier Hydropsyche, Leptocerus, Hydroptila, Goera pilosa, die ihre Köcher seitlich mit Steinchen beschwert, dann Chironomidenlarven, Limnius tuberculatus als Käfer und Larve, Helmiden usw. Von Schnecken ist Ancylus fluviatilis auch hier häufig, stellenweise auch Neritina fluviatilis, die nur den am Nordrand der Alpen liegenden Seen völlig fehlt.

1b) Tiefenregion. Die Uferregion geht ohne scharfe Grenze allmählich in die Tiefenregion über. Die Belichtung nimmt mehr und mehr ab, bis schließlich am Grunde tiefer Seen so gut wie völlige Dunkelheit herrscht. Auch die Temperatur sinkt stetig, die jährlichen Wärmeschwankungen werden

immer geringer und von etwa 100 m Tiefe an herrscht jahraus jahrein eine gleichmäßige Temperatur von ungefähr 4° C. Eine assimilierende Vegetation ist in den lichtlosen Tiefen ausgeschlossen, nur bakterienartige Formen dauern hier noch aus. Den Bewohnern dieser Region steht normalerweise nur ein einziges Substrat zur Verfügung: der äußerst feinflitterige, zähe, durch den Wasserdruck mehr oder weniger kompakt gewordene Schlick; nur ganz ausnahmsweise tritt einmal anstehender Fels auf, während Schlackenstücke aus Dampfern in manchen Seen immer zahlreicher werden. Trotz der großen Einförmigkeit der Lebensbedingungen, die fast nur limikolen Tieren eine dauernde Ansiedelung gestattet, ist die Tiefenfauna unserer Seen im allgemeinen eine ziemlich mannigfaltige, ganz besonders dort, wo die absterbenden und zu Boden sinkenden Reste eines reichen Planktons der Tiefe stetig Nahrung zuführen; am ärmsten sind jene Seen, die als Sedimentirbecken sehr geschiebereicher trüber Gletscherflüsse dienen. Zum Bestand der Tiefenfauna europäischer Seen gehören zunächst eine Anzahl Rhizopoden, von denen einige auf den Grund der Seen beschränkt erscheinen, wie Diplogromia Brunneri, andere daneben auch die Schlickgründe des Seichtwassers bevölkern. Die Coelenteraten sind durch eine blaßrötliche Form von Hydra vulgaris vertreten, während die Spongillen bei uns nur bis etwa 50 m hinabgehen. Von rhabdocoelen Turbellarien verbreitet sich Plagiostomum lemani von den Characeenwiesen des Ufers bis in 300 m Tiefe, ebenso Otomesostoma morgiense, das auch den hochgelegenen Alpenseen nicht fehlt; zu ihnen gesellen sich gelegentlich noch Arten der Gattungen Rhynchomesostomum (Rh. rostratum), Microstomum, Castrada, Mesostomum usw. Von den dendrocoelen Turbellarien hat Dendrocoelum lacteum in der var. bathycola eine eigene Tiefenform ausgebildet; vereinzelt findet sich auch eine Kümmerform von Planaria alpina. Rotatorien, Gastrotrichen, Hirudineen sind am Grunde der Seen nur ganz spärlich in weit verbreiteten Formen vertreten, häufiger erscheinen Nematoden, von denen Dorylaimus crassoides, D. Zschokkei und D. bathybius bis jetzt als Tiefseeformen gelten. Oligochaeten zählen überall zu den häufigsten Bewohnern des Grundschlicks und gehen vom Litoral bis zu den größten Tiefen. Am zahlreichsten sind die Tubificiden, speziell die Gattung Tubifex, von der T. tubifex, T. barbatus, T. ferox, Arten der Gattungen Limnodrilus, Rhyacodrilus, Stylodrilus sowie Bythonomus lemani alle noch jenseits der 100-Meterlinie vorkommen. Unter den Bryozoen bilden die frei in dem festen Schlick steckenden Bäumchen von Fredericella sultana stellenweise noch in über 100 m Tiefe förmliche Bestände. Von den Crustaceen sind vor allem gewisse Ostracoden regelmäßige Bewohner der Tiefe, besonders die Familie der Cytheriden mit Cytheridea lacustris, Limnicythere Sancti-Patricii, die beide bis 200 m Tiefe gehen; neben ihnen finden sich Harpactiden — der gemeine Canthocamptus staphylinus noch in 300 m, — weiter Cyclopiden und Daphniden in einigen Arten, die auch den Schlamm seichter Ufer und diesen weit zahlreicher bevölkern (Iliocryptus, Macrothrix). Die Isopoden sind durch den blinden Asellus cavaticus Foreli, die Amphipoden bei uns durch Niphargus und Gammarus pulex vertreten, der in einer schmächtigen Form im Bodensee sich noch in über 100 m Tiefe findet; in skandinavischen und baltischen Seen Norddeutschlands gesellen sich hierzu noch Pallasea quadrispinosa und Pontoporeia affinis. Der außerordentlich reichen Gammaridenfauna der Tiefen des Baikalsees wurde schon gedacht. Insekten gehören nur als Larven der Tiefe an. Am zahlreichsten sind Chironomiden der Gattungen Orthocladius, Tanytarsus und Tanypus, deren Röhren oft dicht gedrängt weithin den Schlick durchsetzen; aus den übrigen Ordnungen gelangen nur gelegentlich Vertreter hinab. Die Mollusken haben eigene Tiefseeformen ausgebildet, die sich von den litoralen Stammarten hauptsächlich durch geringere Größe und Dünne der Schalen unterscheiden. Von Schnecken gehören hierher Limnaeus abyssicola aus dem Formenkreis des L. auricularius, L. profundus aus demjenigen des L. stagnalis; beide leben noch in 200 bis 260 m Tiefe und haben hier die Luftatmung der Pulmonaten völlig aufgegeben. Ziemlich weit hinab gehen auch Bythinia tentaculata, einige Valvaten (Valvata lacustris bis über 100 m); weiter im Gardasee Neritina fluviatilis und Pyrgula annulata, beide bis 60 m. Von Muscheln gehören die Unionen bei uns fast durchaus der litoralen Region an und sind bis jetzt nicht tiefer als 25 m (im Bodensee) gefunden worden. Ganz anders die Pisidien: sie dringen bis 300 m Tiefe vor und bevölkern den Grundschlick in zahlreichen Formen und meist auch sehr beträchtlicher Individuenzahl. Im Vergleich mit den litoralen Pisidien, mit denen sie jedenfalls genetisch zusammenhängen, sind die Tiefseeformen durchgängig kleiner, nur 2 bis 5 mm lang und von außerordentlicher Zartheit der Schalen; Anwachsstreifen, die sogenannten Jahresringe treten kaum hervor. Von anderen Muscheln lebt Dreyssensia polymorpha in norddeutschen Seen noch in 30 bis 40 m

Tiefe. Tiefseefische sind in unseren Seen einige Coregonen wie Coregonus acronius der Kilch in mehreren Lokalformen, sowie Salmo salvelinus var. profundus, der Tiefseesaibling mit auffallend großen Augen; beide nähren sich von den Pisidien, Schnecken und Chironomidenlarven des Grundschlicks und steigen kaum jemals zur Oberfläche empor. Weiter gehören hierher Silurus glanis der Wels und Lota lota die Aalraupe; letztere wird im Bodensee zusammen mit dem Kilch noch aus 150 m Tiefe heraufgebracht. Die gewaltigen Tiefen des Baikalsees beherbergen die merkwürdige Gattung Comephorus mit zwei Arten; der Michigan- und Ontariosee in Nordamerika besitzen die Gattung Triglopsis.

Ihrer ganzen Zusammensetzung nach besteht somit die Tiefenfauna unserer Seen einerseits aus eurythermen Tieren, die, unempfindlich gegen die verschiedensten Temperaturen, sich vom Ufer aus bis in die größten Tiefen hin verbreiten und sich ständig von oben her ergänzen, andererseits aus einer Anzahl stenothermer Kaltwasserformen, die jetzt die durchwärmten Ufer der Niederungsgewässer meiden, aber diejenigen von Gebirgsgewässern, Hochseen, sowie Bergbäche und Quellen bewohnen. Man nimmt darum an, daß diese stenothermen Formen Relikte der Glazialzeit darstellen, wo auch die Ufer der Niederungsseen noch kühlere Temperaturen aufwiesen als jetzt: die Besiedelung der nordischen sowie der im Bereich der Alpen und höheren Mittelgebirge liegenden Seen konnte erst in der Zeit unmittelbar nach dem Abschmelzen der großen diluvialen Gletscher erfolgen; vorher lagen diese Seebecken tief unter dem Eise begraben. Daraus folgt, daß die Tiefseefauna wie die gesamte Tierwelt dieser Seen geologisch noch recht jugendlichen Datums ist. Dies dürfte auch erklären, warum die Tiefenfauna hier fast keine ihr ausschließlich angehörende Gattungen aufweist. Auch scharf ausgeprägte Tiefsee-Arten sind recht spärlich: wenn wir von einigen Rhizopoden und vielleicht Nematoden absehen, gehört fast nur der Kilch und seine Verwandten hierher, denn die zahlreichen „Arten" der Tiefseepisidien erscheinen doch noch etwas problematisch. Beträchtlicher ist die Zahl der Tiefsee-Varietäten, wennschon die Unterschiede gegenüber den litoralen Stammformen öfter noch ziemlich geringfügig und schwankend sind. Spezielle Anpassungen an die besonderen physischen und biologischen Bedingungen der Tiefe (Dunkelheit, hoher Druck usw.) treten nur bei verhältnismäßig wenigen Formen etwas deutlicher in Erscheinung. Hierher gehören die Kleinheit und Zartheit mancher Tiefseetiere gegenüber ihren litoralen Verwandten wie beispielsweise der Pisidien, das Ausbleichen des Pigments bei dem Kilch, Tiefseesaibling, Comephorus des Baikalsees, den Hydren, die Reduktion der Sehorgane bei Asellus cavaticus Foreli, Niphargus, Dendrocoelum lacteum var. bathycola; auch das Gegenteil, starke Vergrößerung der Augen beim Tiefseesaibling sowie den Comephoriden ließe sich heranziehen, da marine Tiefseefische ähnliches zeigen. Eine biologische Anpassung an die absolute Ruhe des Tiefseewassers dürfte das freie Wurzeln der Hydren sowie der Fredericella sultana im zähen Schlick darstellen, während ihre Artgenossen am Ufer stets an festen Substraten, an Steinen, Holz und Pflanzen fixiert sind. Die Aufgabe der Luftatmung bei den Tiefsee-Limnaeen ist eine Folge des gewaltigen Druckes, der den Schnecken das gewohnte Aufsteigen zur Oberfläche unmöglich macht. Die stets gleichmäßige Temperatur der Tiefe kommt biologisch im Perennieren derjenigen Tiere zum Ausdruck, die in Seichtwasser gegen den Winter hin abzusterben pflegen, wie Fredericella und die Spongillen; auch der Ausfall bestimmter Laichzeiten, wie er für einige Tiefseetiere (Dendrocoelum, Asellus, Pisidien?) festgestellt scheint, gehört wohl hierher.

1c) Die Region des freien Wassers. Plankton. Der flächenhaft entwickelten Ufer- und Tiefenregion, wo die Tier- und Pflanzenwelt auf festem Untergrunde wurzelt, steht die Region des freien Wassers gegenüber, deren flüssiges, labiles und durchsichtiges Medium nach allen Richtungen des Raumes sich dehnt. Noch vor wenigen Jahrzehnten galt diese Region, von einigen Fischen abgesehen, als öde und fast leblos. Heute wissen wir, daß auch hier ein vielgestaltiges Leben sich regt, das frei schwebend und frei schwimmend auch die bodenfernsten Wassermassen erfüllt. Das ist das Plankton, dessen Erforschung die gesamte Süßwasserbiologie mit einer Fülle von Problemen bereichert und darüber hinaus unsere Einsicht in den Kreislauf der organischen Materie nach verschiedenen Richtungen hin auf das nachhaltigste gefördert hat.

α) Zusammensetzung des Planktons. Das Plankton setzt sich aus sehr verschiedenartigen meist mikroskopischen Pflanzen und Tieren zusammen. Auf erstere näher einzugehen ist hier nicht der Ort; bemerkt sei nur, daß die oft in gewaltigen Mengen auftretenden planktonischen Diatomeen, Cyanophyceen und Chlorophyceen nicht nur als „Urnahrung" für die Tierwelt von hoher Wichtigkeit sind, sondern auch durch ihre Sauerstoffproduktion als Durchlüfter des Wassers bedeutsam in dessen Stoffkreislauf eingreifen. Unter den Protozoen spielen die

chromatophorenführenden Flagellaten dieselbe Rolle wie die Algen. Grüne Flagellaten sind im Plankton größerer und tieferer Seen meist nur spärlich vertreten, am ehesten noch durch einige Volvocineen wie Pandorina, Eudorina, Volvox; desto zahlreicher sind sie in seichten Gewässern, besonders solchen mit einer Zufuhr stickstoffhaltiger organischer Substanz, wo dann neben den bereits genannten die Gattungen Pleodorina, Euglena, Phacus, Trachelomonas, Cryptomonas öfter in solchen Mengen auftreten, daß sie dem Wasser ihre Eigenfarbe verleihen. Sehr zahlreich sind auch die goldbraunen Chrysomonadinen, vor allem die zierlichen Bäumchen von Dinobryon, weiter die kugeligen Kolonien von Synura uvella, Uroglena, sowie die Einzelzellen von Mallomonas und Chrysococcus. Die Dinoflagellaten besitzen in dem äußerst variablen Ceratium hirundinella einen der häufigsten und am weitesten verbreiteten Planktonorganismen; weitere Vertreter stellen die Gattungen Glenodinium, Peridinium (P. maeandricum, P. tabulatum, P. Willei), Gonyaulax, Gymnodinium, das auch farblose Arten (G. helveticum) umfaßt. Von Rhizopoden finden sich gelegentlich Difflugiaarten, von Heliozoen ist Rhaphidocystis lemani eine dem freien Wasser eigentümliche Gattung. Planktoninfusorien sind Codonella und Tintinnidium, weiter besonders in kleineren Gewässern Didinium, Disematostoma usw. Einen sehr charakteristischen Bestandteil des Süßwasserplanktons bilden die Rotatorien in zahlreichen Gattungen und Arten. Seen und seeartige Altwasser bewohnen besonders die Gattungen Conochilus und Conochiloides, Floscularia, Asplanchna (As. priodonta), Synchaeta, Polyarthra, Triarthra, Rattulus, Anuraea, Notholca, von der Notholca longispina eine sehr ausgedehnte horizontale und vertikale Verbreitung besitzt, Ploesoma, Anapus, Hudsonella usw. Die Crustaceen bilden in größeren Gewässern die Hauptmasse des Planktons. Unter den Cladoceren ist Bythotrephes völlig auf große und tiefe Seen beschränkt, während Leptodora daneben auch Altwasser und selbst Teiche bewohnt. Sehr verbreitet ist die Gattung Bosmina, deren zahlreiche Lokalformen sich bei uns auf die Formenkreise von Bosmina coregoni (in Seen) und Bosmina longirostris (auch in kleineren Gewässern) zurückführen lassen. Aeußerst variabel nach Raum und Zeit ist auch die Gattung Daphne, speziell Daphne longispina, in deren Formenkreis gegenwärtig alle früher als besondere Arten unterschiedenen Planktondaphnien wie D. cucullata, D. hyalina, D. cristata usw. einbezogen werden. Weitere Gattungen des freien Wassers sind Diaphanosoma, Limnosida (im Norden), Ceriodaphnia besonders in seichteren Gewässern. Vielleicht noch häufiger als die Cladoceren sind die Copepoden, bei denen auch die Jugendstadien, die Nauplien, dem Plankton angehören. Die Gattung Cyclops umfaßt neben litoralen auch planktonische Arten wie Cyclops strenuus, C. Leukkartii, C. oithonoides. Diaptomus bevölkert das freie Wasser der größten Seen bis zu den kleinsten Tümpeln: sehr verbreitet sind Diaptomus gracilis und D. graciloides hauptsächlich in den Gewässern der Niederungen, während Diaptomus bacillifer und D. denticornis auf Seen von nordischem oder alpinem Charakter beschränkt erscheinen, die auch den Hauptaufenthalt der wenigen Arten der Gattung Heterocope darstellen. Eurytemora bewohnt das Brackwasser und Seen im Bereich des Meeres und dringt nur entlang der große Flüsse weiter nach denn Binnenlande vor. Unter den Amphipoden bildet Macrohectopus (Constantia) den Hauptbestandteil des Planktons des Baikalsees; Larven des Dekapoden Caridina bevölkern das freie Wasser des Viktoria Nyanza. Von den übrigen Abteilungen des Tierreiches finden sich im Plankton gelegentlich Hydracarinen wie Atax crassipes, dann etwas regelmäßiger die Larven von Corethra, die unmittelbar über dem Grund schweben; auch die Larven der Muschel Dreyssensia polymorpha schwimmen frei umher.

Mit dem Plankton ist die Lebewelt des freien Wassers noch nicht erschöpft. Auch Fische nehmen hier ihren dauernden Aufenthalt; man hat sie als Nekton dem Plankton gegenübergestellt. Hierher gehören gewisse Coregonen, vor allem Coregonus Wartmanni der Blaufelchen des Bodensees sowie dessen Verwandte in den übrigen nordalpinen Randseen: er nährt sich ausschließlich von Plankton und sammelt sich in Schwärmen in jenen Schichten, die jeweils die meisten Planktonkruster enthalten. Auch die sterile Form von Trutta lacustris, die Schwebforelle, tummelt sich meist im freien Wasser ebenso die Jungbrut zahlreicher anderer Fische, vor allem die des Barsches; von Cypriniden nähren sich Alburnus lucidus und A. mento in Seen hauptsächlich von Plankton.

β) Schwebeeinrichtungen. Ständig in einem Medium zu schweben, das gar keine Ruhepunkte darbietet, vermögen nur Organismen, die dasselbe spezifische Gewicht wie das Wasser haben. Spezifisch schwerere Organismen, wie alle Planktontiere, müssen

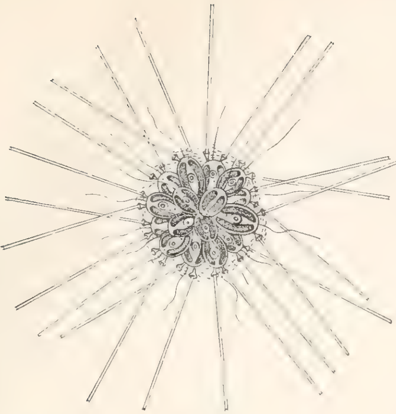


Fig. 11.



Fig. 12.



Fig. 13.



Fig. 14.

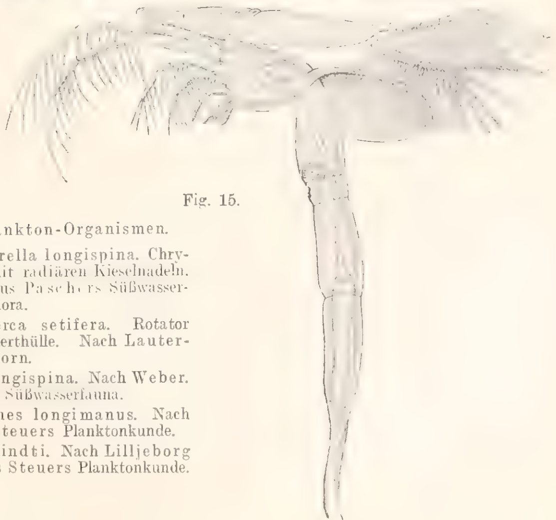


Fig. 15.

Fig. 11 bis 15. Plankton-Organismen.

Fig. 11. Chrysosphaerella longispina. Chrysomonadinenkolonie mit radiären Kieselnadeln. Nach Lauterborn. Aus Paschers Süßwasserflora.

Fig. 12. Mastigocerca setifera. Rotator in völlig hyaliner Gallerthülle. Nach Lauterborn.

Fig. 13. Notholca longispina. Nach Weber. Aus Brauers Süßwasserfauna.

Fig. 14. Bythotrephes longimanus. Nach Lilljeborg. Aus Steuers Planktonkunde.

Fig. 15. Leptodora Kindti. Nach Lilljeborg und Weismann. Aus Steuers Planktonkunde.

der Schwerkraft durch entsprechende Schwimmbewegungen entgegenarbeiten. Der Kraftaufwand für diese steten Bewegungen wird um so geringer sein, je mehr der Körper Einrichtungen besitzt, welche die Sinkgeschwindigkeit herabsetzen. Dazu dienen sehr verschiedene, bisweilen miteinander kombinierte Mittel. Zunächst sind spezifisch leichte Stoffwechselprodukte wie fette Oele imstande, die Schwebefähigkeit beträchtlich zu erhöhen; sehr reich an solchen Oelkugeln sind vor allem die Copepoden. In anderen Fällen halten gaserfüllte Räume den Körper in der Schwebe: das schönste Beispiel nach dieser Richtung hin bieten die Larven von Corethra mit ihren gaserfüllten Tracheenblasen. Eine Verringerung des spezifischen Gewichtes wird auch durch entsprechende Vergrößerung der Oberfläche erreicht. So besitzen viele Planktontiere im Gegensatz zu den schwereren kompakteren Bodenformen einen gewissermaßen aufgelockerten zarten und dünnhäutigen Körper, in welchem die inneren Organe in weiten mit Flüssigkeit erfüllten Hohlräumen suspendiert sind: hierher gehören von Rädertieren die Gattungen Asplanchna und Synchaeta, von Daphniden Leptodora (Fig. 15), alle völlig glasartig durchsichtig. Auch Koloniebildung vergrößert die Oberfläche: sie findet sich gelegentlich bei Heliozoen (Rhaphidocystis), regelmäßig bei gewissen Flagellaten (Volvocineen, Dinobryon, Synura usw.) sowie einigen Rotatorien (Conochilus). Hand in Hand damit geht öfter die Ausscheidung einer sehr wasserreichen Gallerte, die auch als Schutz dient; gallertumhüllte Einzeltiere finden sich bei Floscularia, Conochilus, Conochiloides, Mastigocerca setifera unter den Rädertieren (Fig. 12), Holopedium unter den Crustaceen. Sehr verbreitet ist die Ausbildung langer Dornen, Borsten und Stacheln, die den eigentlichen Körper öfter um ein beträchtliches übertreffen; sie wirken, wenn sie nur die Längsachse des Körpers vergrößern, als Balancierapparate und sichern auch die Richtung bestimmter Bewegungen. Lange hohle Kieselnadeln strahlen allseitig vom kugeligen Körper der Heliozoe Rhaphidocystis sowie den Kolonien der Flagellate Chrysosphaerella (Fig. 11) aus; bei Ceratium hirundinella ist der Panzer in plasmaerfüllte Fortsätze ausgezogen, deren Länge beträchtlichen Schwankungen unterliegt. Unter den Rotatorien sind Notholca longispina (Fig. 13), dann gewisse Arten von Brachionus, Anuraea, weiter Schizocerca am Vorder- und Hinterende des Panzers mit oft sehr ansehnlichen längsgerichteten Dornen bewehrt; bei einer Varietät von Brachionus pala stehen die hinteren Fortsätze senkrecht zur Längsachse des Körpers. Die gelenkig mit dem Körper verbundenen Springborsten von Triarthra, die schwertförmigen flossenartigen Anhänge von Polyarthra sowie die mit Fiederborsten versehenen armartigen Fortsätze von Pedalion ermöglichen diesen Tieren weite Sprünge durch das Wasser. Bei den Crustaceen stellen besonders die riesigen Antennen der Diaptomiden in gespreiztem Zustande wirksame Schwebeapparate dar, ebenso die befiederten Ruderantennen der Daphnien, die bei den planktonischen Gattungen weit stärker entwickelt sind als bei den Formen des Ufers und des Bodens. Der überaus lange Schwanzstachel von Bythotrephes (Fig. 14) dient als Balancierapparat. Alle diese Dornen, Borsten und Stacheln sind als Schwebevorrichtungen nur wirksam am lebenden Organismus und — von den wenigen Fällen abgesehen, wo dieselben allseitig radiär von einem kugeligen Körper abstehen wie bei Rhaphidocystis und Chrysosphaerella — meist auch nur bei bestimmten Stellungen des Tieres; nach dem Tode sinken alle Planktonorganismen zu Boden.

γ) Masse, horizontale und vertikale Verbreitung des Planktons. Der sehr verschiedene Planktongehalt der einzelnen Seen ist in hohem Grade abhängig von deren jeweiligem Gehalte an gelösten mineralischen und organischen Verbindungen, den Nährstoffen für das autotrophe Phytoplankton. Je reicher diese „Urnahrung" in Gestalt von Algen, Diatomeen, chromatophorenführenden Flagellaten, desto reicher und vielgestaltiger auch die Tierwelt. Die gelösten Nährstoffe für die Pflanzen — in erster Linie Nitrate, Kalk, Phosphorsäure, Kalium, Natrium, Magnesia, Eisen — entstammen teils den Zuflüssen, teils werden sie aus dem Boden ausgelaugt. Aus diesem Grunde sind Seen mit reicher Uferentwickelung, sanft abfallender Halde, schlammigem oder schlickigem kalkreichem Untergrund reicher an Plankton als Seen mit steilen, rasch zur Tiefe sinkenden steinigen und felsigen Ufern. Weiter wird die Entwickelung der assimilierenden Organismen gefördert durch ausgiebige Belichtung und höhere Temperaturen, so daß seichte freiliegende leicht sich erwärmende Seen relativ mehr Plankton produzieren als tiefere und kühlere Seen desselben Gebietes.

Die horizontale Verbreitung des Planktons über die Fläche eines Sees ist im allgemeinen ziemlich gleichmäßig, ganz besonders, soweit die mehr schwebenden als schwimmenden Organismen in Frage kommen. Planktontiere, die größere vertikale Wanderungen vollführen, sind naturgemäß an den Bereich des Tiefenwassers gebunden und

treten darum in Seen mit langsam abfallender Halde erst in bestimmter Entfernung vom Ufer regelmäßiger auf.

Die vertikale Verbreitung des Planktons ist in allen nicht gar zu seichten Seen eine ungleichmäßige: das Plankton ist hier zonarisch geschichtet und in verschiedenen Tiefen in sehr verschiedenen Mengen vorhanden. Zunächst erfüllt es in tiefen Seen keineswegs die ganze Wassermasse bis zum Grunde, sondern beschränkt sich mehr oder weniger auf eine Oberflächenschicht, die je nach der Durchsichtigkeit des Sees verschieden weit hinabreicht: im Bodensee und Starnberger See liegt beispielsweise die untere Grenze der Planktonschicht bei 35 m, im Walchensee bei 85 m, im Genfersee, Luganer- und Comersee bei etwa 100 m und darüber; jenseits dieser Grenze beginnt die fast planktonleere abyssale Region. Die belebte Planktonzone zeigt nun eine Schichtung insofern, als die einzelnen Gruppen der Planktonorganismen je nach ihrer Empfindlichkeit für Licht und Temperatur tagüber bestimmte Tiefen aufsuchen, wo dann ihre Individuenmenge die größte Dichte erlangt. Die Tiefen mit den jeweils optimalen Bedingungen für die Copepoden, Daphniden, Rotatorien usw. wechseln nun von See zu See je nach dem physischen und biologischen Gesamtcharakter des Gewässers und verschieben sich auch mit der Jahreszeit: im allgemeinen dürfte aber doch in unseren klaren und tiefen Seen folgende Gliederung weitere Gültigkeit haben. Zunächst dem Wasserspiegel schweben die assimilierenden planktonischen Algen, vor allem die Cyanophyceen, weiter die Chlorophyceen, die Diatomeen und chromatophorenführenden Flagellaten, dann die Infusorien sowie zahlreiche Rädertiere. Etwas tiefer folgen die Crustaceen, zunächst die Daphniden mit den Gattungen Diaphanosoma, Bosmina, Daphne, dann Leptodora und Bythotrephes, schließlich die Hauptmasse der Copepoden mit Cyclops strenuus und Heterocope, letztere beide im Bodensee an häufigsten in 15 bis 28 m Tiefe, in mehreren Seen der Schweiz (Vierwaldstätter See, Genfersee) noch beträchtlich tiefer. Bei grellem Sonnenschein sind in klaren Seen die obersten Wasserschichten äußerst arm an Tieren; erst in 1 bis 2 m beginnen letzere etwas häufiger zu werden. In Gewässern mit einer reichlichen Entwickelung von Cyanophyceen wirkt die den Wasserspiegel schleierartig überziehende „Wasserblüte" als Lichtschirm, der die oberflächlichen Schichten vor allzu starker Insolation schützt und so auch hier ein reicheres Tierleben ermöglicht.

Die zonare Schichtung des Planktons ist am schärfsten an sonnenhellen Sommertagen ausgeprägt. In dunklen Nächten verwischt sie sich dagegen fast völlig, indem dann die lichtscheuen Crustaceen zur nahrungsreicheren Oberfläche emporsteigen, oft in solchen Massen, daß sie wie im Bodensee das Plankton hier auf das 60fache des Tagesquantums anreichern. Die Amplitude dieser aktiven Vertikalwanderungen schwankt in den einzelnen Seen je nach deren Tiefe und Durchsichtigkeit sehr beträchtlich: im Vierwaldstätter See beträgt sie für Bosmina coregoni, Leptodora bis 40 m, für Bythotrephes, Daphne hyalina und Diaptomus sogar noch mehr. Im Winter tritt die zonare Schichtung fast ganz zurück und das sehr artenarm gewordene Zooplankton verteilt sich ziemlich gleichmäßig nach der Tiefe.

δ) Periodizität und Cyclomorphose. Masse und Artbestand des Planktons zeigen im Laufe eines Jahres sehr beträchtliche Schwankungen. Am geringsten sind beide in unseren Breiten meist im Winter, besonders in den Monaten Januar und Februar, der Zeit der tiefsten Temperaturen. Mit dem Frühling nimmt die Zahl der Arten mehr und mehr zu und erreicht im Hochsommer etwa von Juni bis in den September hinein, ihr Maximum. Weniger gleichmäßig verläuft die Kurve des in einer bestimmten Wassermenge jeweils vorhandenen Gesamtvolumens des Planktons: Massenentfaltungen einzelner Arten besonders des Phytoplanktons, bisweilen auch von Flagellaten, Rotatorien und Crustaceen können zu sehr verschiedenen Jahreszeiten eintreten; die Kurve wird dann mehrgipfelig.

Holoplanktonten, d. h. Planktontiere und -pflanzen, die auch als Arten dauernd dem freien Wasser angehören, scheinen bei uns dem Süßwasser zu fehlen. Wohl leben hier oft zahlreiche Generationen völlig frei, fern von Grund und Ufer; aber einmal kommt es im Entwickelungsgang der Art doch zur Bildung von Dauerzuständen, die zu Boden sinken und hier eine längere oder kürzere Ruheperiode durchmachen. Trotz alledem gibt es im Süßwasserplankton eine ganze Anzahl perennierender Formen die wegen der Kürze ihrer Ruheperiode in keinem Monat des Jahres völlig vermißt werden, wenn sie vielleicht auch in einem bestimmten Gewässer eine Zeitlang aus dem Plankton verschwinden sollten. Beispiele bieten von den Protozoen Dinobryon, Synura, Peridinium tabulatum, von Rädertieren Asplanchna priodonta, Polyarthra platyptera, Triarthra longiseta, Anuraea cochlearis, Anuraea aculeata, Notholca longispina, von Crustaceen Bosmina, Diaptomus gracilis. Den Gegensatz zu diesen eurythermen perennierenden Formen bilden die stenothermen temporären Planktonten, deren

Auftreten und maximale Entfaltung an bestimmte Temperaturen gebunden ist. Es lassen sich hierbei Sommerformen und Winterformen unterscheiden. Zu den Sommerformen gehören von den Flagellaten Pleodorina, Ceratium hirundinella in seichten Gewässern, gewisse Arten von Peridinium (P. glenodinium, P. quadridens), Glenodinium (G. gymnodinium), Gymnodinium (G. helveticum), von Rotatorien die Gattungen Pedalion, Anuraeopsis, Ploesoma, Schizocerca, Anapus, weiter eine Anzahl Arten der Gattungen Floscularia, Synchaeta, Rattulus, Brachionus; von Crustaceen Diaphanosoma, Leptodora, Bythotrephes, Cyclops oithonoides, Cyclops Leuckarti usw. Winterformen sind spärlicher: Gymnodinium tenuissimum, Peridinium aciculiferum unter den Flagellaten, Disematostoma, Didinium cinctum, Holophrya nigricans unter den Infusorien bieten die markantesten Beispiele; unter den Rotatorien fällt die Hauptentwickelung der Formenreihe Notholca acuminata - labis - striata, weiter von Notholca foliacea auf die kühlere Jahreshälfte; Conochiloides natans scheint bei uns auf die Monate Dezember bis Mai beschränkt.

Alle diese Planktonorganismen haben ihren eigenen jährlichen Entwickelungsgang, der meist ganz gesetzmäßig verläuft. Am deutlichsten tritt dies bei den periodischen Planktonten in Erscheinung: sie erscheinen zu bestimmten Zeiten, nehmen allmählich an Zahl zu, erreichen ein Maximum der Häufigkeit und verschwinden dann ziemlich bald wieder nach Bildung von Dauerzuständen. Bei den perennierenden Arten tritt maximale Entfaltung im Laufe eines Jahres nur selten einmal, meist zweimal oder auch mehrere Male ein, stets im Anschluß an den Zyklus der Fortpflanzung. Die Vermehrung des Individuenbestandes erfolgt bei den Protozoen durch Teilung, bei den Rotatorien und Daphniden durch Parthenogenese, also auf ungeschlechtlichem Wege; geschlechtliche Fortpflanzung führt hier zur Bildung von Dauerzuständen, die den Zyklus beschließen.

Eine Anzahl Planktonorganismen zeigt im Laufe eines Jahres bestimmt gerichtete Veränderungen der Körpergestalt, die man als temporale Variationen oder als Zyklomorphosen bezeichnet hat. Dieselben stehen allem Anschein nach mit Veränderungen der Tragfähigkeit des Wassers, mit dessen Viskosität im Zusammenhang, die eine Funktion der Temperatur ist: sie beträgt bei +25° C nur noch die Hälfte von derjenigen bei 0° C. Die Zyklomorphose wäre demnach also eine Reaktion des Organismus, die sinkende Tragfähigkeit des Mediums durch entsprechende Erhöhung der Schwebefähigkeit möglichst auszugleichen. Im einzelnen tritt das in verschiedener Weise in Erscheinung. Ceratium hirundinella verlängert in zahlreichen stark durchwärmten Gewässern vom Frühling bis zum Hochsommer sein apikales und antapikales Horn immer mehr unter steter Verkürzung des Querdurchmessers der Zelle und fortschreitender Reduktion des linken Hinterhorns. Kühlere Gewässer haben breite plumpe Formen, die sich nur wenig ändern (Fig. 16). Bei dem Rädertier Anuraea cochlearis geht die robuste mit mächtigem Hinterdorn bewehrte Winterform macracantha mit steigender Temperatur unter steter Reduktion der Körpergröße und des Hinterdorns schließlich in die kleine und leichtere Anuraea cochlearis tecta über, bei der der Hinterdorn völlig fehlt; andere Variationsreihen führen zur Ausprägung der Sommerformen hispida und irregularis, deren Panzer mit spitzen Höckern bedeckt ist, die den Reibungswiderstand vergrößern und damit die Sinkgeschwindigkeit verlangsamen (Fig. 17). Unter den Daphniden stellen im Formenkreise von Daphne longispina-cucullata die früher als Arten betrachteten Formen apicata, berolinensis, cucullata, kahlbergensis eine zyklomorphische Reihe dar: die Frühlingsformen apicata und berolinensis mit gerundetem oder zugespitztem niederen Kopfe verlängern diesen mit steigender Wassertemperatur immer mehr zu einem förmlichen Helm, der bei der Hochsommerform kahlbergensis schließlich sogar die Länge der Schale erreichen kann (Fig. 18).

Arktisches und tropisches Plankton. Unsere Kenntnisse des Planktons und seine Lebensverhältnisse sind im wesentlichen an Gewässern der nördlich gemäßigten Zone gewonnen worden, die sehr beträchtlichen jährlichen Temperaturschwankungen unterliegen. Weit gleichmäßigere Temperaturverhältnisse zeigen tropische und arktische Seen. Planmäßige Untersuchungen könnten hier manche noch strittige Frage über den Einfluß äußerer Bedingungen auf Auftreten, Fortpflanzung, Periodizität und Zyklomorphose des Planktons klären. Leider liegen solche bis jetzt nur sehr wenige vor und bilden darum ein wichtiges Desiderat für die Zukunft.

Arktisches Plankton. Fortlaufende Beobachtungen über den Jahreszyklus des Planktons in arktischen Gewässern besitzen wir aus Island. Ueber sieben Monate sind diese Seen mit einem dicken Eispanzer bedeckt, unter dem das Wasser von Dezember bis April eine Temperatur von 1° C besitzt; im Hochsommer steigt dieselbe bis auf etwa 12° C an. Das Phytoplankton ist sehr arm: es besteht hauptsächlich aus weitverbreiteten Diatomeen (Asterionella,

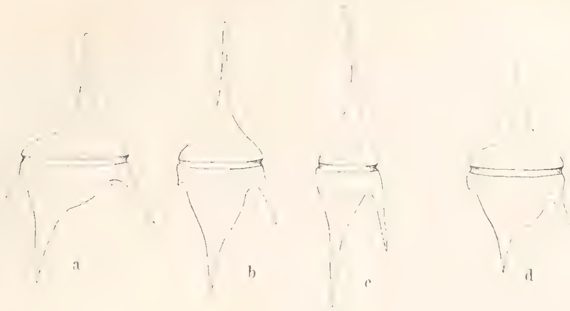


Fig. 16.

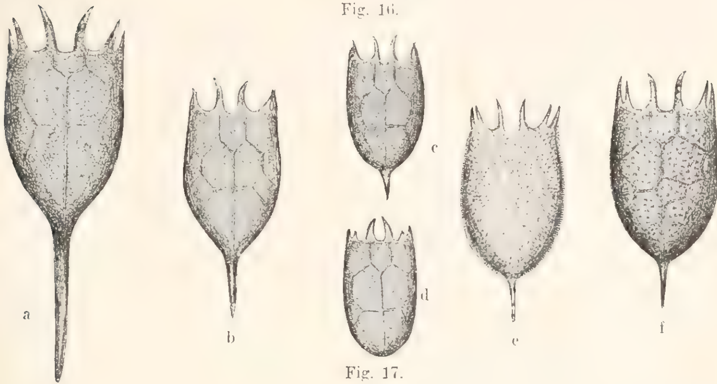


Fig. 17.



Fig. 18.

Fig. 16 bis 18. Zyklomorphosen von Planktonorganismen des Süßwassers.

Fig. 16. Zyklomorphose von Ceratium hirundinella. a Frühlingsform, b und c Hochsommerformen, aus Altwassern des Rheins, d plumpe Seeform (Bodensee).

Fig. 17. Zyklomorphose des Rädertieres Anuraea cochlearis. Langdornige Winterform a durch Reduktion der Dornen über den Typus b in die kleine hintere dornenlose A. cochlearis tecta, d übergehend, e und f Sommerformen A. c. hispida und A. c. irregularis, deren Panzer mit Höckern bewehrt ist. Nach Lauterborn. Aus Brauers Süßwasserfauna.

Fig. 18. Zyklomorphose der Daphnide Daphne longispina cucullata. a Frühjahrsform apicata durch Verlängerung des Kopfhelmes in die Sommerformen b cucullata und c Kahlbergensis übergehend. Orig.

Fragilaria crotonensis, Melosira) sowie Desmidiaceen; von Flagellaten ist Peridinium aciculiferum am häufigsten, das thermophile Ceratium hirundinella scheint zu fehlen. Reicher ist das Zooplankton. Die Rotatorien weisen durchweg perennierende Formen auf: Conochilus unicornis, Asplanchna priodonta, Synchaeta, Polyarthra platyptera, Notholca, longispina, Notholca striata — diese beiden bei uns am zahlreichsten im kühlen Wasser — sowie Anuraea cochlearis. Die Crustaceen sind durch Daphne longispina, den psychrophilen Cyclops strenuus sowie die arktischen Typen Diaptomus minutus sowie Bosmina obtusirostris vertreten. Im ganzen also ein Gemisch eurythermer Tiere mit stenothermen Kaltwasserformen unter völligem Ausschluß thermophiler Arten. Peridinium aciculiferum, bei uns eine ausgesprochene Winterform, entfaltet sich in Island am zahlreichsten im Frühjahr. Die Rotatorien kommen das ganze Jahr hindurch vor mit einem Maximum der Häufigkeit im Hochsommer. Alle Arten sind hier monozyklisch, auch diejenigen, welche bei uns polyzyklisch oder dizyklisch sind wie Asplanchna priodonta. Von den Crustaceen ist Cyclops strenuus perennierend, die übrigen finden sich vom Frühling bis weit in den Herbst hinein; Daphne longispina, bei uns meist polyzyklisch hat hier anscheinend zwei Geschlechtsperioden. Zyklomorphosen fehlen.

Tropisches Plankton. Das Wasser der eigentlichen Tropenseen zeigt wie die darüber ruhende Luft das ganze Jahr hindurch eine sehr gleichmäßige hohe Temperatur meist über 20° C. Der Wechsel zwischen Trocken- und Regenzeiten dürfte sich hauptsächlich dadurch bemerkbar machen, daß letztere den Gehalt an organischer Substanz des Wassers durch Einschwemmungen vom Lande her beträchtlich steigern. Das Plankton scheint nach den bis jetzt vorliegenden mehrmonatlichen Beobachtungen an Seen Ceylons sowie Befunden am Viktoria Nyanza in Afrika kaum jemals den Reichtum an Arten und Individuen aufzuweisen wie manche seichte Seen und Altwasser oft bei uns. Von Algen finden sich neben Diatomeen (Melosira usw.), Chlorophyceen usw. besonders Cyanophyceen wie Clathrocystis aeruginosa, Anabaena, bei uns Sommerformen. Flagellaten sind anscheinend ziemlich sparsam: erwähnt werden von echten Planktonformen Ceratium hirundinella, Peridinium inconspicuum, Volvox aureus, Dinobryon cylindricum var. ceylanicum. Beträchtlich reicher sind die Rotatorien: Conochiloides natans, Asplanchna amphora, Polyarthra platyptera, Triarthra longiseta, Tetramastix opoliensis, Schizocerca diversicornis, Brachionus pala in mehreren besonderen Varietäten, Brachionus forficula, Br. falcatus, Br. angularis, Anuraea cochlearis, An. aculeata valga, Pedalion mirum — mit Ausnahme von Conochiloides natans fast alles Arten, die bei uns für das Plankton sommerlich durchwärmter an organischen Stoffen reicher Teichgewässer charakteristisch sind. Anuraeopsis navicula fehlt bis jetzt bei uns. Ein ganz anderes Bild bieten die Crustaceen. Nur Cyclops Leuckarti bei uns Sommerform — und Chydorus sphaericus erinnern an die heimische Fauna; die übrigen Formen wie Diaphanosoma singhalense, Moina submucronata, mehrere Arten von Ceriodaphnia, Diaptomus Annae (Ceylon) Diaptomus Galebi (Afrika) tragen ein durchaus tropisches Gepräge. Dazu kommen noch ein freischwimmender Ostrakode (Cypris purpurascens), im Viktoria Nyanza Larvenstadien des Dekapoden Caridina Wyckii, weiter in verschiedenen afrikanischen Seen die Meduse Limnocnida tanganjicae. Trotz der gleichmäßigen Temperatur zeigt das Plankton auch hier eine Periodizität insofern, als seine Masse und Zusammensetzung nach den einzelnen Monaten ziemlich wechselt. Dies dürfte in erster Linie in dem verschiedenen Entwickelungsgang der einzelnen Arten begründet sein, weiter wohl aber auch darin, daß mit dem Wechsel der Trocken- und Regenzeiten der Gehalt an Phytoplankton und damit die Nahrung der Planktontiere beträchtlich schwankt: Nahrungsfülle steigert die Vermehrungsgeschwindigkeit und die Zahl der Eier und fördert so Massenentfaltungen. Ueber Zyklomorphosen tropischer Planktonorganismen liegen keine Beobachtungen vor; sie sind bei der gleichmäßigen Temperatur der Gewässer auch wenig wahrscheinlich.

2. Teiche und Sümpfe. See, Teich, Sumpf und Moor sind durch alle Uebergänge miteinander verbunden und stellen vielfach nur Glieder einer fortschreitenden Entwicklungsreihe dar. Geschiebe und Sinkstoffe der Zuflüsse erhöhen langsam aber stetig die Sohle eines jeden Sees; ist diese einmal auf ein bestimmtes Niveau aufgelandet, so rückt die Pflanzenwelt der Ufer immer weiter gegen die Mitte vor und engt die offene Blänke mehr und mehr ein: der See schrumpft zum Teich zusammen und geht durch weiteres Wuchern der Vegetation schließlich in einen Sumpf oder Moor über. Weiter entstehen teichartige Gewässer durch Verlandung von Altwassern, Auskolkungen durch Hochwasser der Flüsse, dann aber auch — bei uns sicherlich in der Mehrzahl der Fälle — künstlich durch Ausschachtungen des Erdreichs bis in den Bereich des Grundwassers oder durch Aufstauung und Abdämmung fließender Gewässer. Allen Teichen gemeinsam ist die geringe Tiefe, welche die Ausbildung einer besonderen abyssalen Region natürlich völlig ausschließt. Die jahreszeitlichen Schwankungen der Temperatur teilen sich der ganzen Wassermasse mit; überall dringt das Licht bis zum Grunde und gestattet der Vegetation hier festen Fuß zu fassen, wo sie dann oft weithin den Boden in dichten Rasen übergrünt und in flutenden Büschen zur Oberfläche emporstrebt.

Die Tierwelt der Teichgewässer läßt sich gegenüber derjenigen der Seen negativ charakterisieren durch das Fehlen bestimmter Seeformen, besonders im Bereich des Planktons und der Tiefe: Beispiele

bieten die Coregonen, Saiblinge, Seeforellen, Bythotrephes, Bosmina coregoni usw., alles Formen des kühl temperierten Wassers. Die litorale Fauna der Seen, soweit sie an die Pflanzenbestände gebunden ist, kehrt in den Teichen fast vollständig wieder; sie entfaltet sich in deren ruhigem pflanzendurchwuchertem Wasser meist weit üppiger als im Wellenbereich der großen Seen, so vor allem die Protozoen, Rotatorien, rhabdocoelen Turbellarien, Naiden, die Daphniden aus der Familie der Chydoriden und Macrothriciden, Wasserwanzen, Käfer, Larven von Libellen, Schnecken der Gattungen Limnaeus und Planorbis, Larven der Urodelen und Anuren usw. Ueberall, wo die Pflanzenwelt den Spiegel noch nicht allzusehr eingeengt hat oder durch geschlossene Bestände am Grunde den Uebertritt der Nährstoffe aus dem Boden in das freie Wasser erschwert, ist auch in den Teichen das Plankton nach Masse und Artenzahl wohl entwickelt und besonders quantitativ fast stets reichlicher als in den bodenfernen Weiten der Seen. Besonders charakteristisch für das Teichplankton ist die Massenentfaltung der Rotatorien, vor allem der Gattungen Brachionus (Brachionus pala in zahlreichen Formen, Br. falcatus, Br. forficula, Br. budapesthinensis), Schizocerca, Pedalion, die hier ihre eigentliche Heimat haben, ebenso wie die Arten Asplanchna Brightwellii, Rhinops vitrea, Triarthra mystacina, Triarthra breviseta, Conochilus volvox, Anuraeopsis hypelasma. Dazu kommen noch fast sämtliche Rotatorien des Seenplanktons, von denen nur Notholca longispina und Conochiloides natans stark durchwärmte kleinere und seichtere Teiche zu meiden scheinen. Unter den Flagellaten färben die Gattungen Volvox, Eudorina, Pandorina, Pleodorina besonders im Sommer das Wasser der Teiche oft grün, Synura, Uroglena, Dinobryon, Ceratium hirundinella, Peridinium oft braun; spärlicher sind die farblosen Formen wie Sphaeroeca, Bicosoeca socialis. Die Infusorien sind besonders durch Disematostoma, Bursaridium, Didinium, Holophrya nigricans vertreten. Von Crustaceen gehören die Arten der Gattung Ceriodaphnia, Bosmina cornuta-longirostris, Diaptomus coeruleus vorherrschend dem Teichplankton an; von Seeformen kommen Diaphanosoma, Daphne longispina, Leptodora, Diaptomus gracilis, verschiedene Cyclopsarten auch in Teichen vor; selbst Heterocope und Eurytemora sind vereinzelt hier gefunden worden.

Am Boden der Teiche breiten sich nur selten größere freie Schlickflächen aus; meist lagert hier ein lockerer, mit organischen Resten durchsetzter Schlamm, reich an Diatomeen, Rhizopoden, Nematoden, Oligochaeten, Ostrakoden, Larven von Chironomiden und Sialiden, vielfach auch durchpflügt von Anodonten, die hier oft sehr beträchtliche Größe erlangen. Solange das Wasser genügend Sauerstoff enthält, wird die organische Substanz der zu Boden sinkenden abgestorbenen Pflanzen und Tiere durch die Selbstreinigung aufgearbeitet, zersetzt und immer wieder in den allgemeinen Kreislauf der organischen Materie einbezogen. Anders jedoch, wenn es am Grunde stagnierender Gewässer zu größeren Anhäufungen faulender Pflanzensubstanz kommt, was in kleineren sehr vegetationsreichen Teichen und Tümpeln namentlich vor Spätherbst bis zum Frühling leicht der Fall ist. Dann bewirken die Fäulnis- und Gärungsvorgänge eine sehr beträchtliche Sauerstoffzehrung, die bis zu völligem Sauerstoffschwund führen kann; an Stelle der normalen Oxydation der organischen Substanz treten Reduktionsprozesse unter Entbindung größerer Mengen lebensfeindlicher Gase wie Schwefelwasserstoff, Methan, Kohlensäure usw. Der normale fast geruchlose Schlamm geht in stinkenden Faulschlamm über, in dem nur solche Organismen noch auszudauern vermögen, die die Fähigkeit besitzen, auch ohne Sauerstoff, also anaerob zu leben. Zu dieser sapropelischen Lebewelt gehören neben Schwefelbakterien und verwandten Formen zahlreiche Protozoen, unter ihnen der größte Rhizopode des Süßwassers Pelomyxa palustris, dann besonders eine Anzahl höchst charakteristischer Gattungen von Infusorien wie Caenomorpha, Discomorpha, Pelodinium, Dactylochlamys, Pelamphora, Metopus, Opisthodon mit zum Teil sehr bizarren Gestalten. Von Rotatorien leben hier die Gattungen Diplacidium, Diplois, Atrochus, weiter Diglena biraphis und Floscularia atrochoides; von Gastrotrichen sind mehrere Chaetonotusarten, weiter die Gattungen Stylochaeta, Dasydites, Aspidiophorus, Gossea auf den Faulschlamm beschränkt. Von anderen Tieren finden sich gelegentlich Nematoden, Cyclopiden und Harpactiden, Ostracoden, sowie Larven von Stratiomys und Ptychoptera.

Werden die freien Wasserflächen durch Gramineen und Cyperaceen völlig überwuchert, so entsteht der Sumpf, als dessen Typus der Rohrsumpf gelten mag, der die Ränder von Seen und Altwassern sowie die Ufer träge durch die Niederungen ziehender Flüsse oft weithin begleitet. Das Wasser ist für gewöhnlich nur ganz seicht, klar, am Grunde durchzogen von den Rhizomen des Schilfrohrs und bedeckt mit dessen abgestorbenen Resten, dazu durch die dicht ge-

drängten hochhalmigen Stengel meist ziemlich stark beschattet; submerse Wasserpflanzen treten ganz zurück. Die niedere Tierwelt ist meist ziemlich arm: am zahlreichsten sind noch Schnecken, Hirudineen und an der Oberfläche Wanzen der Gattungen Gerris und Microvelia; bei steigendem Wasser ziehen auch die Fische gern hierher. Sehr charakteristisch ist dagegen die Vogelwelt der Rohrsümpfe: ihr schützendes Dickicht birgt die Niststätten der Rohrdommeln, zahlreicher Reiher, der Löffler, Pelikane, Rohrhühner, Rallen, Taucher und Enten, weiter der Rohrsänger, der Bartmeise und des Rohrammers. Im Herbste fallen hier Tausende von Staren und Schwalben zur Nachtruhe ein.

3. Moore. Moore im Naturzustand zeigen oft auf weite Strecken hin keine offenen Wasserflächen; nur da und dort sind Tümpel und kleinere Teiche eingesenkt, deren Zahl durch die Anlage von Torfgruben beträchtlich vermehrt wird. Man unterscheidet Wiesen- und Hochmoore. Die Wiesenmoore grenzen meist an Seen, Altwasser und Flüsse und erfüllen verlandete Betten derselben. Ihre Vegetation besteht hauptlich aus rasenbildender Cyperaceen besonders Carexarten, Equiseten sowie gewissen Moosen, speziell Hypnaceen; ihr Wasser ist stets mehr oder weniger reich an Kalk und zeigt am Grunde oft recht beträchtliche Ablagerungen von Eisenoxydhydrat. Die Tierwelt der Wiesenmoorteiche und -tümpel hat die Mehrzahl der Arten mit der Fauna der Sümpfe und Teiche, einige auch mit derjenigen der Hochmoore gemeinsam. Als Charakterformen können vielleicht die Chironomidenlarven mit tragbaren Gehäusen gelten, die bis jetzt ausschließlich in dicht mit Hypnaceen und Equiseten erfüllten Tümpeln von Wiesenmooren gefunden worden sind; von Daphniden scheinen Bunops serricaudata sowie Kurzia latissima hauptsächlich hier zu Hause zu sein.

Anders die Hochmoore, die vorherrschend aus der schwammigen bleichgrünen Polstern von Torfmoosen der Gattung Sphagnum bestehen. Sie sind durchaus an kühlere und niederschlagsreiche Gebiete gebunden und gehören in typischer Ausbildung vor allem dem Norden sowie den Gebirgen an, wo sie vielfach Refugien für Relikte der Glazialzeit, sowohl von Tieren als von Pflanzen, darstellen. Das Wasser der Hochmoore, meist durch Huminsubstanzen braun gefärbt, entstammt zum größten Teil dem Regen und Nebel und ist darum auch stets sehr arm an mineralischen Bestandteilen, vor allem an Kalk. In den wasserstrotzenden Moospolstern leben Rhizopoden, Philodiniden, Tardigraden usw.; weit reicher ist die Tierwelt der von flutenden Sphagnum- und Utricularia-Büschen durchwucherten Tümpel, Kolke und Gräben, sowie der alten verlandenden Torfgruben. Zu den charakteristischsten Mitgliedern dieser sphagnophilen Fauna gehören Rhizopoden der Gattungen Nebela, Hyalosphenia (H. papilio), Ditrema, Placocysta, Flagellaten wie Rhipidodendron, Gonyostomum semen, Glenodinium uliginosum, die Chrysomonadinen Cyclonexis, Chlorodesmus, Palatinella, von Infusorien Trichopelma und Drepanomonas. Unter den Rotatorien sind sphagnophil die Gattungen Microcodites, Arthroglena, Elosa, weiter Rotifer Roeperi, Callidina bidens, Adineta vaga, Oecystes pilula, Copeus caudatus, Dinocharis intermedia, Anuraea serrulata, Ploesoma triacanthum; von Gastrotrichen gehören mehrere Arten von Chaetonotus (Chaetonotus Chuni, Ch. macrochaetus) weiter Ichthydium forcipatum hierher, von rhabdocoelen Turbellarien Fuhrmannia turgida, Castrada sphagnetorum, C. Hofmanni, von Oligochaeten Marionia sphagnetorum und Veidowskyella comata. Unter den Daphniden ist das Vorkommen von Streblocerus serricaudatus, Drepanothrix, Acantholeberis, vielleicht auch von Chydorus latus an kalkarme Moorgewässer gebunden; auch Holopedium und Polyphemus sind hier am häufigsten. Als spagnophile Tardigraden gelten besonders Diphascon scoticum und Macrobiotus hastatus. Von Insektenlarven leben in den Torfgewässern die Larven der bereits früher genannten Torfmoorlibellen Agrion hastulatum, Somatochlora arctica, Cordulia alpestris und Leucorhinia dubia; von Käfern scheint Crenitis punctostriatus hier seine eigentliche Heimat zu haben.

Ein Ueberblick über die Fauna der Hochmoore zeigt eine große Vielgestaltigkeit der mikroskopischen Lebewelt, während die makroskopische Tierwelt im allgemeinen verhältnismäßig ärmlich vertreten ist. Mollusken fehlen mit Ausnahme einiger kleiner Pisidien, Limnaen und Planorben wegen der Kalkarmut des Wassers fast völlig, ebenso meist auch Spongillen, Bryozoen, Hirudineen, Malakostraken, Hydrachniden, Fische; auch die Insektenwelt ist ziemlich monoton und läßt sich nicht entfernt mit derjenigen kalkreicherer Teiche und Tümpel vergleichen.

4. Periodische Gewässer. Im Gegensatz zu den bisher behandelten perennierenden Gewässern, die ständig Wasser führen, sind die periodischen Gewässer einer zeitweiligen oft monatelang oder selbst jahrelang währenden Austrocknung unterworfen. Hierher gehören Schmelzwassertümpel im

Frühjahr, sommerliche Regenlachen und -pfützen, Tümpel im Ueberschwemmungsbereich der Flüsse. Die größte Ausdehnung erreichen die periodischen Gewässer in Steppengebieten, wo die Regenzeit die Niederungen oft weithin unter Wasser setzt, das dann die sommerliche Dürre bis auf den letzten Tropfen wieder aufsaugt. Die Bewohner dieser ephemeren Gewässer müssen alle die Fähigkeit besitzen, sich in der oft nur kurz bemessenen Zeit der Wasserfülle rasch zu entwickeln und Dauerzustände zu bilden, die auch eine länger währende Austrocknung, in kühleren Gebieten auch ein völliges Ausfrieren ertragen. Diese Bedingungen verwirklichen in unseren Breiten am besten gewisse Protozoen, rhabdocoele Turbellarien, Rotatorien sowie Crustaceen, neben einigen Copepoden und Daphnien besonders die Euphyllopoden, deren Vorkommen durchaus an periodische Gewässer geknüpft ist und die darum auch als Leitformen für diese gelten dürfen. Je nach ihrer Entstehung und nach Jahreszeit zeigen die einzelnen Tümpel, Lachen und Pfützen eine etwas verschiedene Zusammensetzung ihrer Tierwelt. Die Schmelzwassertümpel bilden sich im Frühjahr besonders auf bewachsenem Moorgrund, in Wiesen und Wäldern; ihr Wasser ist klar und erreicht nur selten höhere Temperaturen. Hier ist die Heimat von Lepidurus apus und Branchipus Grubei; von rhabdocoelen Turbellarien erscheinen die Gattungen Dalyellia besonders Dalyellia viridis, weiter Arten von Olisthanella und Mesostomum; Rotatorien und Daphniden sind nur spärlich vertreten. Schmelzwassertümpel der Arktis beherbergen Lepidurus glacialis, Polyartemia forcipata, Artemiopsis und Branchinecta paludosa, die südwärts bis zur Tatra geht. Die Regenwasserlachen des Sommers sammeln sich mehr auf freiem Gelände, auf Aeckern, Triften, Rändern von Feldwegen, wo meist der nackte Lehmuntergrund zutage tritt; ihr Wasser ist stets mehr oder weniger getrübt und erwärmt sich unter den sengenden Sonnenstrahlen sehr stark, auch in unseren Breiten bisweilen über 30° C. Die Euphyllopoden sind hier durch Apus cancriformis, Branchipus stagnalis, Cyzicus, Leptestheria vertreten, alles thermophile Formen, die in wärmeren Klimaten den größen Artenreichtum erlangen. Von Daphniden entfalten sich hier die verschiedenen Moina-Arten in großer Individuenzahl, von Rotatorien Hydatina senta, die mit den minimalsten Wasseransammlungen wie Pfützen in Wagengeleisen usw. vorlieb nimmt; von Protozoen Euglena, Chlamydomonas, kleine Glenodiniumarten, Didinium usw. Ueberschwemmte Wiesen mit klarem Wasser beherbergen im Sommer oft Massen von Limnadia lenticularis vielfach auch Lynceus brachyurus, die Rotatorien sind durch die frei schwimmenden Kolonien von Megalotrocha semibullata und wohl auch M. spinosa charakteristisch vertreten.

Ist diesen Gewässern durch wiederholte Regengüsse oder anhaltende Ueberschwemmungen eine längere Dauer beschieden, so wird ihre Tierwelt immer vielgestaltiger und nähert sich mehr derjenigen der Teiche. Insekten legen ihre Eier hier ab und schmutzige Tümpel wimmeln oft in kurzer Zeit von Culexlarven, während Anopheles das klare Wasser über bewachsenem Grunde vorzieht. Auch Wasserkäfer stellen sich ein, weiter Wanzen, besonders Corixa-Arten, Ephemeridenlarven wie Cloeon, Ostrakoden, Daphniden besonders Daphne pulex, D. magna, Ceriodaphnia, Simocephalus, Arten von Cyclops und Diaptomus, Turbellarien, Flagellaten wie Volvox, Infusorien usw. Nicht selten legen auch spätlaichende Anuren, besonders Hyla ihre Eier in diese Tümpel ab und die in dem durchwärmten Wasser rasch heranwachsenden Kaulquappen räumen bald gewaltig unter der Tierwelt auf.

C. Subterrane Gewässer. Grundwasser, Brunnen, Höhlen.

Von dem Wasser, das als Regen und Schnee zur Erde fällt, verdunstet ungefähr ein Drittel, ein Drittel fließt oberflächlich ab, der Rest versickert in den Boden. Hier sinkt es zur Tiefe, bis es auf eine undurchlässige Schicht kommt, auf der es dann, der Schwere folgend, als Grundwasser langsam den tiefsten Punkten zuströmt. Man ist im allgemeinen geneigt anzunehmen, daß das Grundwasser nur im Bereich des festen Gesteins, dessen Verwerfungen und Klüften folgend, in eigenen Rinnsalen dahinzieht, im Schwemmland dagegen in kapillarer Verteilung seinen Weg sucht; in letztem Falle wäre natürlich kein Raum für die Entfaltung einer eigenen Grundwasserfauna. Diese Anschauung dürfte kaum überall zutreffen, allem Anschein nach ist das Grundwasser durchaus imstande, auch in den Kies- und Sandmassen des Schwemmlandes sich eigene Rinnsale und Becken zu schaffen. Das beweisen Befunde auf Neuseeland, wo tiefe Brunnen, die nirgends die fluviatilen Aufschüttungen durchteuften, eine sehr reiche und charakteristische Dunkelfauna, teilweise ziemlich großer Oligochaeten (Phreodrilus, Phreogetes), Isopoden (Phreatoicus), Amphipoden (Crangonyx, Cruregens, Paraleptamphopus, Gammarus), Schnecken (Potamopyrgus) aufwiesen. Sehr reich ist auch die Fauna eines artesischen Brunnens bei San Marcos

in Texas, der aus 58 Meter Tiefe nicht nur charakteristische Cyclopiden, Ostrakoden (Cypridopsis), Isopoden (Coedidothea, Cirolanides), Amphipoden (Crangonyx) und Dekapoden (Palaemonetes antrorum) auswarf, sondern sogar eine eigene Gattung von Urodelen, die blinde Typhlomolge Rathbuni an die Oberfläche gelangen ließ. Auch die Dunkeltiere der europäischen Brunnen: Bothrioplana Semperi und Euporobothria bohemica unter den Turbellarien, Trichodrilus pragensis, Haplotaxis gordioides, Bythonomus Lankesteri, Aeolosoma tenebrarum unter den Oligochaeten, Niphargus, Boruta, Crangonyx, Bathyonyx unter den Crustaceen, weiter Siettitia balsetensis der blinde Dytiscide könne nur mit dem Grundwasser in die tiefen, oben meist völlig abgeschlossenen Schachte gelangt sein. Systematische Untersuchungen auf diesem Gebiete dürften noch manche Ueberraschung zutage fördern.

Die reichste Entfaltung erlangt die subterrane Fauna naturgemäß in den Höhlen, die namentlich die zerklüfteten Kalkgebirge oft in weiter Erstreckung durchziehen. In ihren stets dunklen und kühlen Bächen und Flüssen, Kolken, Becken und Seen führen Vertreter sehr verschiedener Tierklassen ein verborgenes Dasein. Von Urodelen bewohnt der allbekannte Olm (Proteus anguineus) Höhlen Krains, Istriens usw.; Typhlotriton spelaeus und Spelerpes Stejnegeri die Höhlen von Missouri. Eigentliche Höhlenfische scheinen Europa zu fehlen: die in Karstflüssen von Dalmatien, Bosnien und der Herzegowina vorkommenden Gattungen Aulopyge Huegeli, Paraphoxinus alepidotus, P. Ghetaldi, P. Pstrosi, Chondrostomum phoxinus und Ch. Reiseri leben etwa ein Drittel des Jahres auch in offenen Gewässern. Völlig blind sind dagegen Amblyopsis, Typhlichthys, Chologaster Agassizii, Amiurus nigrilabris in Höhlen Nordamerikas, Lucifuga und Stygicola in solchen Kubas. Unter den Mollusken besiedeln die kleinen Lartetien (Vitrella) in zahlreichen Formen die Höhlen unserer Kalkgebirge, von wo sie bisweilen auch in die Quellen gelangen. Die winzigen nur 1 bis 1,5 mm im Durchmesser erreichenden Valvata erythropomatia und V. spelaea sind bis jetzt nur in Höhlen von Krain gefunden worden. Sehr zahlreich sind die Höhlenkrebse. Von den zahlreichen Cambarusarten des atlantischen Nordamerika gehören einige (Cambarus pellucidus usw.) auch zum Bestand der Höhlenfauna; eine Art wird auch für unterirdische Gewässer Istriens sowie der Herzegowina angegeben. Weitere kavernikole Dekapoden sind Palaemonetes antrorum in Texas, Palemonias in Amerika, Troglocaris Schmidti in Höhlen von Krain und Istrien. Von Amphipoden gehören Niphargus, Crangonyx, Bathyonyx hierher, von Isopoden Asellus cavaticus, der auch in Quellen sowie in der lichtlosen Tiefe der Seen wiederkehrt, dann Monolistra, Coecosphaeroma, Vireia, Cirolanides, Typhlocirolana usw. Von Copepoden leben Cyclops teras, C. crinitus, C. Zschokkei, C. unisetiger durchaus subterran, gelegentlich auch weitere Arten von Cyclops und Canthocamptus. Höhlenplanarien sind Dendrocoelum infernale sowie Planaria cavatica, die bisweilen auch in Quellen übertritt.

Mit dieser Uebersicht ist die Zahl der in den Höhlengewässern überhaupt vorkommenden Tiere noch lange nicht erschöpft, da in Höhlen, deren Zuflüsse mit der Oberwelt in Verbindung stehen, zahlreiche Tiere eingeschwemmt werden, die in der Dunkelheit dann oft lange Zeit anzudauern und sich selbst zu vermehren vermögen. Diesen Gästen fehlen aber die Hauptcharaktere der wahren „Troglobien“: der völlige Verlust oder doch die weitgehende Reduktion der Sehorgane, die starke Entwickelung der Organe des Tastsinnes und verwandter Funktionen, weiter die Ausbleichung des Pigmentes: weiß oder blaßrötlich ist die Farbe der eigentlichen Dunkeltiere, manche sind auch fast völlig durchsichtig geworden.

Die Höhlen haben manche Tiertypen bewahrt, die der oberirdischen Fauna desselben Gebietes ganz fremdartig gegenüberstehen. Besonders auffällige Beispiele bieten der Olm und — wenn sich das Vorkommen im Karstgebiet bestätigen sollte — Cambarus, die in Europa völlig isoliert stehen und ihre nächsten Verwandten erst in Nordamerika besitzen. Es ist durchaus wahrscheinlich, daß es sich hier um Relikte einer einst weiter verbreiteten zusammenhängenden tertiären Fauna handelt, welchen die Abgeschlossenheit und die gleichförmigen Lebensbedingungen ihrer Refugien ein Ueberdauern der Eiszeit ermöglichte.

D. Uebergänge zur Landfauna.

Zahlreich sind die Fäden, welche die Tierwelt des Wassers mit jener des Landes verknüpfen. Ueberschwemmte Ufer von Seen und Teichen, überrieselte Steine und Felsen, durchfeuchtete Moosrasen und nasse Sand- oder Schlickflächen am Rande der Flüsse und Bäche, die Spritzzone im Bereich der Wellen — alles das sind Grenzgebiete, wo die Unterschiede zwischen Land- und Wasserleben sich mehr oder weniger verwischen.

a) Uferfauna. Eine sehr beträchtliche Anzahl von Tieren, die man als Riparier zusammenfassen kann, ist an die ständig durchfeuchteten Ufer unserer Gewässer gebunden.

Hierher gehören Oligochaeten, besonders der Gattung Helodrilus, Enchytraeiden, Nematoden, Schnecken der Gattungen Vitrina und Succinea, Hyalinia crystallina, Zonitoides nitida, Limax laevis, Isopoden, Harpactiden, Tardigraden, Collembolen, Araneiden der Gattungen Lycosa, Dolomedes, Pirata, Stylothorax, Fliegen wie Hilara, Lispa, Myopina, Hydrophorus, Campricnemus und viele andere, Wanzen der Gattungen Hebrus, Salda und sehr zahlreiche Käfer, wie Omophron, Elaphrus, Bembidium, Paederus, Stenus, Lesteva usw.

b) Fauna hygropetrica. Eine eigene hierher gehörige Lebensgemeinschaft bildet die sogenannte Fauna hygropetrica, die Tierwelt ständig in dünnster Schicht überrieselter sonnbestrahlter Felswände ohne höhere Vegetation. Die charakteristischen Elemente dieser Fauna gehören fast durchgängig Insektenlarven an. Von Trichopteren sind die kleinen Larven der Gattung Stactobia (St. fuscicornis, St. Eatoniella) völlig auf diese Lokalitäten beschränkt; ferner leben hier einige Arten von Tinodes, Helicopsyche sowie Beraea maurus. Die Fliegen sind durch die Larven von Orphnephila testacea, Dactylolabis, Pericoma nubila, Dicranomya trinotata, Dixa maculata sowie Stratiomytiden wie Hermione pulchella usw. vertreten. Von Wanzen findet sich bisweilen Hydrometra stagnorum hier. Nur die Trichopterenlarven entnehmen ihre Atemluft dem sie umspülenden sauerstoffreichen Wasser und zwar durch die Haut: Tracheenkiemen fehlen ihnen völlig. Die Fliegenlarven atmen atmosphärische Luft, die bei der Dünne der Wasserschicht überall direkt an die offenen Stigmen herantreten kann.

c) Moosfauna. Die Moospolster und Flechtenkrusten an Bäumen, Felsen und Mauern beherbergen neben Landtieren wie Milben, Pseudoskorpionen, Thysanuren, Insekten usw. auch eine Anzahl mikroskopischer Tiere, die nur zum Leben erwachen, wenn ein ausgiebiger Regen ihre Aufenthaltsorte gründlich durchnäßt; verdunstet das Wasser wieder, so gehen sie in verschiedene Ruhezustände über (Trockenstarre, Cysten), die sie monate- und selbst jahrelange Austrocknung sowie die extremsten Wärme- und Kältegrade ohne Schaden ertragen lassen. Zu diesen Moosbewohnern gehören Rhizopoden wie Amoeba terricola, Amphizonella violacea, mehrere Arten von Difflugia und Nebela, Arcella arenosa, Trinema enchelys, Heleopera sylvatica, Assulina seminulum, Nematoden, darunter die beiden bis jetzt nur in Moosen gefundenen Gattungen Bunonema und Craspedonema, Rädertiere mit einer ganzen Anzahl charakteristischer Arten der Gattung Callidina; die Crustaceen sind durch Harpactiden (Moraria muscicola) vertreten. Besonders zahlreich sind die Tardigraden mit den Gattungen Macrobiotus, Milnesium, Echiniscus, Arctiscon, die hier ihre eigentliche Heimat haben. Die meisten dieser Muscicolen zeigen eine sehr ausgedehnte horizontale und vertikale Verbreitung und dringen am weitesten in die unwirtlichen Regionen der Hochgebirge und Polargebiete vor.

V. Die Verbreitung der Süßwasserfauna.

Die ganze Verteilung des Süßwassers auf der Erde bringt es mit sich, daß die Verbreitung der eigentlichen Wassertiere von einem Gewässer zum anderen nur selten, beispielsweise bei Seen desselben Flußgebietes, bei größeren Ueberschwemmungen, in dem gleichen Medium möglich ist. In den meisten Fällen muß dieselbe über das trockene Land und durch die Luft erfolgen. Flugbegabte Wasserinsekten überwinden diese Schranken mit Leichtigkeit aktiv, bei den meisten anderen Tieren geschieht die Verbreitung hauptsächlich auf dem Wege passiver Migration. Direkte Uebertragung kommt nur für wenige durch Schalen oder sonstige Hüllen einigermaßen geschützte Tiere wie Schnecken, Muscheln, Ostrakoden, sehr schleimige Würmer, dann für den gallertreichen Laich der Schnecken, Amphibien und einiger Fische in Betracht. Für gewöhnlich erfolgt die Verschleppung der Mikrofauna durch besondere Dauerstadien, die für die Süßwasserorganismen besonders charakteristisch sind. Hierher gehören die Cysten der Protozoen, die Gemmulae der Spongillen, die Statoblasten der Bryozoen, die Dauereier der rhabdocoelen Turbellarien, Rotatorien und Crustaceen, alles sehr resistente Gebilde mit derben Membranen, die auch eine länger dauernde Austrocknung ohne Schaden ertragen (Fig. 1 bis 7). Die Verfrachtung dieser Keime kann durch Luftströmungen, Vögel oder auch durch den Menschen erfolgen.

1. „Kosmopolitismus" der Süßwasserfauna. Die öfter gehörte Behauptung von dem „kosmopolitischen Charakter der Süßwasserfauna" ist in dieser weiten Fassung nicht zutreffend. Kosmopolitisch im wahren Sinne des Wortes sind in ihrer überwiegenden Mehrheit eigentlich nur die Protozoen und wohl auch die Rotatorien, die nach den bisherigen Beobachtungen in zahlreichen durchaus identischen Arten und bisweilen selbst Varietäten die entferntesten Kontinente bewohnen. Bei anderen Abteilungen macht sich dagegen eine geographische Differenzierung geltend derart, daß zu kosmopolitischen Formen immer mehr Gattungen und Arten treten, welche auf bestimmte größere oder kleinere Gebiete beschränkt sind. Es sei nur, um bei der Mikrofauna zu bleiben, auf die niederen Crustaceen verwiesen. Von den Copepoden ist Cyclops nicht nur als Gattung sondern auch in einer Reihe von Arten so gut wie kosmopolitisch, während Diaptomus als Gattung ebenfalls über alle Erdteile verbreitet ist, in seinen zahlreichen Arten jedoch durchweg eine oft sehr weitgehende Lokalisierung zeigt. Bei den Cladoceren haben wir neben kosmo-

politischen Gattungen und auch Arten eine ziemliche Reihe von Gattungen, die auf bestimmte Gebiete (Norden, Tropen) beschränkt sind. Aehnliches gilt von Ostrakoden. Wie es sich mit dem Kosmopolitismus der höheren Typen verhält, möge aus dem Kapitel: Bestand der Süßwasserfauna ersehen werden.

Man hat den Kosmopolitismus der niederen Süßwasserfauna auch durch deren hohes geologisches Alter erklären wollen. Es fragt sich jedoch, ob diese Erklärung für sich allein ausreichend ist. Jedenfalls muß es auffallend erscheinen, daß Organismen, die bei uns auf Wechsel der äußeren Lebensbedingungen oft so scharf durch entsprechende lokale und temporale Variationen reagieren, beispielsweise in den Tropen bisher so wenige Formen von irgend einer etwas höheren systematischen Valenz ausgeprägt haben sollten. Das gilt in erster Linie für die Protozoen und Rotatorien. Nun ist es aber gewiß kein Zufall, daß gerade diese auch als Ganzes am meisten kosmopolitisch verbreiteten Gruppen die kleinsten und leichtesten Dauerstadien von allen Tieren besitzen. Dies läßt die Auffassung begründet erscheinen, daß der Grad des Kosmopolitismus nicht allein von dem geologischen Alter, sondern in hohem Maße auch von der größeren oder geringeren Verschleppbarkeit der Dauerstadien abhängig ist.

Es dürfte keinem Zweifel unterliegen, daß Luftströmungen, in zweiter Linie auch Vögel ständig zahllose Dauerkeime niederer Wassertiere über ungeheure Gebiete der Erde verbreiten. Wenn trotzdem die Gewässer bestimmter Gebiete ihren biologisch-faunistischen Charakter bewahren, so weist dies darauf hin, daß keineswegs jede Verschleppung auch zu einer dauernden Besiedelung führt. Die einzelnen Organismen stellen an die Beschaffenheit ihrer Wohngewässer recht verschiedene Ansprüche und entfalten sich oft nur beim Zusammentreffen ganz spezieller Bedingungen der nächsten Umwelt: das geht schon daraus hervor, daß benachbarte Gewässer, zwischen denen ein Austausch der Faunenelemente so leicht ist, dennoch eine recht verschiedene Tierwelt aufweisen können. Ein entscheidender Umstand ist ferner, ob die neuen Elemente dem Wettbewerb mit den bereits vorhandenen angepaßten Arten gewachsen sind. Die günstigste Aussicht sich zu behaupten haben Tiere, welche sofort nach dem Verlassen des schützenden Dauerstadiums imstande sind, für sich allein auf kürzestem Wege einen größeren Bestand fruchtbarer Individuen zu erzeugen, was die Gefahr einer Wiederverdrängung natürlich beträchtlich vermindert. Das vermögen Formen mit ungeschlechtlicher Fortpflanzung und ohne Larvenstadien: die Protozoen durch einfache Teilung, die Rotatorien und Daphniden durch Bildung zahlreicher parthenogenetischer Subitaneier. Dies erklärt zum großen Teil, warum gerade diese Tiergruppen so ungeheure Gebiete erobern konnten. Im übrigen hindert leichte Verschleppbarkeit und ständige Aussäung von Keimen keineswegs die Ausprägung bestimmter Lokalformen in der einzelnen Gewässern. Das beweisen die planktonischen Flagellaten (Ceratium hirundinella), Rotatorien (Anuraea cochlearis), Daphniden (Bosmina, Daphne longispina), alles sehr weit verbreitete und sehr plastische Arten, die fast in jedem See charakteristische Lokalformen aufweisen. Letztere sind nun nichts anderes als morphologische Reaktionen des Organismus auf den Komplex der speziellen Bedingungen des Wohngewässers, die auf alle Individuen der Art einwirken. Diesem Einfluß unterliegen mit der Zeit natürlich auch die jeweils neu eingeschleppten Individuen, die so mehr und mehr dem herrschenden Typus angenähert, schließlich gewissermaßen assimiliert werden können.

2. Geschichte der Süßwasserfauna Mitteleuropas seit dem Tertiär. Die jetzige geographische Verbreitung der Süßwassertierwelt ist das Ergebnis einer langen und wechselreichen geologischen Geschichte. Wann sich die Fauna des Süßwassers von derjenigen des Meeres abgezweigt hat ist ungewiß, aller Wahrscheinlichkeit nach bereits vor dem Devon; Ganoiden und Dipnoer lassen sich bis in jene ferne Epoche zurückverfolgen und stellen somit wohl die ältesten Typen dar. Amphibien treten im Karbon hinzu. Von rezenten Molluskengattungen erscheinen Neritina und Cyrene bereits im Lias, Planorbis, Paludina, Melania, Hydrobia im braunen Jura, Limnaeus, Physa, Unio im weißen Jura.

Ein einigermaßen sicheres Bild der Süßwasserfauna läßt sich erst vom Tertiär an gewinnen. Zahlreiche Funde — besonders die ausgezeichnet erhaltenen Fossilien der miozänen Süßwasserkalke von Oeningen unweit des Bodensees — zeigen, daß damals in Mitteleuropa die Fauna einen mehr oder weniger subtropischen Charakter trug und (wie die Flora) manche Anklänge an die jetzige Tierwelt des südlichen Nordamerika sowie Japans aufwies. Damals lebten bei uns Riesensalamander (Andrias Scheuchzeri), Riesenfrösche (Lathonia) dem brasilianischen Cerotophrys verwandt, Palaeobatrachus mit Merkmalen der Aglossen, Krokodile, große Weichschildkröten (Trionyx), Schnappschildkröten aus der jetzt auf Nordamerika beschränkten Gattung Chelydrina. Von Fischen fanden sich neben

zahlreichen Cypriniden, Acanthopsiden, Esociden usw. auch Cyprinodonten der Gattungen Poecilia und Lebias; Salmoniden sind nicht nachgewiesen. Sehr reich waren auch Insekten vertreten, besonders Libellen, Wasserwanzen, unter ihnen neben Nepa- und Corixaarten ein riesiges Belostoma (B. speciosum) sowie die Gattung Diplonychus, weiter Wasserkäfer der Gattungen Hydrophilus (H. giganteus), Hydrous, Cybister, Dineutes, der jetzt Europa fehlt. Von Crustaceen sind Süßwasserkrabben (Telphusa), Garneelen, Gammarus, Schalen von Ostrakoden, Ephippien von Daphnien, von Mollusken Limnaeen, Planorben, Valvaten, Neritinen, weiter Arten von Melania, Melanopsis, Unio, Anodonta und Cyclas erhalten.

Mit der fortschreitenden Abkühlung, die gegen das Ende des Tertiär sowie im Pliozän immer stärker in Erscheinung tritt, verarmt und verödet diese wärmeliebende Fauna mehr und mehr. Die Eiszeit naht. Von Norden her rückt das Inlandeis nach Süden bis gegen Mitteldeutschland vor, von den Alpen senken sich die Gletscher weit in die Vorländer herab: die arktische und die alpine Tierwelt wird in die Niederungen gedrängt und mischt sich auf dem vergleichsweise schmalen Streifen eisfreien Geländes zwischen beiden Vergletscherungen mit den resistenteren Resten der tertiären Fauna. Das Klima war kühl, die Vegetation tundren- und steppenartig. Die gewaltigen geschiebeerfüllten Ströme, die in zahllosen Rinnsalen die trüben Schmelzwasser der Gletscher nach Nordwesten abführten, dürften verhältnismäßig arm an Tieren und Pflanzen gewesen sein; reicher war wohl das Leben in den Flüssen und Bächen der Mittelgebirge, in den geschlossenen Altwassern und Seen sowie in den Teichen und Tümpeln der Tundra, die sich im Sommer stärker erwärmten und auch eine Vegetation von Wasserpflanzen aufwiesen. Mit der Besserung des Klimas gegen das Ende der Diluvialzeit folgten die kälteliebenden Tiere und Pflanzen den abschmelzenden Gletschern teils nach Norden, teils stiegen sie in die Gebirge empor, wo die kühlen Quellen und Bäche, die Tiefen der Seen, die Hochmoore inmitten der Lebewelt eines milderen Klimas eine Anzahl von Tieren und Pflanzen der Eiszeit in inselartig zersprengten Resten bis auf den heutigen Tag bewahrt haben. Das sind die sogenannten Glazialrelikte, zu denen hauptsächlich gewisse Crustaceen, Hydrachniden, Planarien, weiter Fische wie die Coregonen, Insekten (Wasserkäfer, Neuropteren, Odonaten) sowie wahrscheinlich auch einige Rotatorien und Flagellaten gehören — alles stenotherme Kaltwasserformen, die den durchwärmten Gewässern der Niederungen fehlen.

In der der Eiszeit folgenden Periode erfuhr die Tierwelt Mitteleuropas weitere Besiedelung von Osten sowie teilweise auch von Südwesten her (gewisse Insekten wie Thremma, Stactobia, Oligoneuria usw.). Einem Zurückfluten der durch die Eiszeit nach Süden gedrängten wärmeliebenden Fauna stellte der weitgestreckte Querwall der Alpen die größten Hindernisse entgegen, während die zahlreichen gegen Norden strömenden Flüsse Zuzüglern von dorten günstige Wanderstraßen tief in das Binnenland hinein eröffneten. All das erklärt die Armut unserer Gewässer an eigenen Typen und den vorherrschend nordischen Charakter der Süßwasserfauna Mitteleuropas bis zu den Alpen.

Anders in Nordamerika. Hier, wo die Gebirgszüge in meridionaler Richtung streichen, konnte beim Herannahen der großen Vergletscherung die wärmeliebende Tierwelt ungehindert weit nach Süden ausweichen und beim Rückzug des Eises dann wieder nach Norden zurückfluten, wobei das von einem Tropenmeer in zahllosen Zuflüssen sich weit nach Norden verästelnde Stromnetz des Mississippi die Wege wies. So haben die Gewässer der Vereinigten Staaten in ihren Schildkröten, Perennibranchiaten, Ganoiden, in ihren vielgestaltigen Teleosteern, Unionen, Schnecken zahlreiche tertiäre Typen bewahrt, die in Europa durch die Eiszeit bis auf kümmerliche Reste verdrängt und vernichtet worden sind.

3. Allgemeine Verbreitung der Süßwasserfauna über die Erde. Die großen tiergeographischen Regionen der Erde sind im wesentlichen auf die Verbreitung der höheren Landwirbeltiere, der Säugetiere und Vögel begründet. Schon die Amphibien und Fische, noch mehr die Wirbellosen, seien es nun Mollusken oder Krebse, wollen sich diesem Schema nicht mehr fügen: ihre Abhängigkeit von dem feuchten Element, die Verschiedenartigkeit der Verbreitungsmittel, ihr hohes geologisches Alter bestimmten ihre Ausbreitung über die Erde nach anderen Gesetzen als denjenigen der Säugetiere und Vögel. So stellen sich einer Gliederung der Süßwasserfauna als Ganzes in bestimmt umschriebene Regionen die größten Schwierigkeiten entgegen, die noch dadurch vermehrt werden, daß wir über die Verbreitung zahlreicher Gruppen außerhalb Europas und Nordamerikas nur recht mangelhafte Kenntnisse besitzen. In folgendem soll daher auch zunächst nur versucht werden, in den allgemeinsten Zügen einen Ueberblick über die Verbreitung der Süßwasserfauna in ihrer Abhängigkeit von den großen klimatischen Regionen zu geben; in zweiter Linie sind auch die wichtigsten der jeweiligen

Charakterformen angeführt, über deren speziellere Verbreitung der Abschnitt: Bestand der Süßwasserfauna weitere Auskunft gibt.

A. Arktische Region. Die stehenden Gewässer der arktischen Region sind den größten Teil des Jahres mit einer dicken Eisdecke verschlossen; seichtere frieren bis auf den Grund aus. Die Temperatur schwankt zwischen 0° bis etwa 13° C, bleibt also auch im Hochsommer noch recht kühl. Seen, Teiche und Schmelzwassertümpel mit torfigem Untergrund sowie Moosmoore haben die weiteste Verbreitung. Das Plankton dieser nahrungsarmen kühlen Gewässer ist nach Art- und Individuenzahl ziemlich spärlich: von assimilierenden Planktonten überwiegen Diatomeen und Dinoflagellaten, unter den Tieren neben kosmopolitischen eurythermen und psychrophilen Rotatorien die Crustaceen mit einigen charakteristischen Arten (Bosmina obtusirostris, Diaptomus minutus, D. glacialis). Bei der Kürze der Entfaltungszeit tritt schon nach wenigen parthenogenetischen Generationen sexuelle Fortpflanzung auf. Amphibien fehlen, Mollusken sind spärlich; von Fischen dominieren die Salmoniden (Salmo, Coregonus). Unter den Crustaceen sind Polyartemia, Polyartemiella und Artemiopis für die arktischen Schmelzwassertümpel charakteristisch.

B. Nördlich gemäßigte Region. In dieser Region sind die stehenden Gewässer der Niederungen meist nur wenige Monate, öfter nur wenige Wochen mit Eis bedeckt; ihre Temperatur schwankt zwischen 0° bis über 30° C. Der Boden der Seen und Teiche besteht aus Schlick und Schlamm, die Vegetation ist in der wärmeren Jahreszeit reich entwickelt; Torfmoore rücken nach Süden zu immer mehr in die Gebirge. In den dichter besiedelten Ländern schränkt die Austrocknung der Moore, die Verlandung der Altwasser, die Korrektion und Verschmutzung der Flüsse die Aufenthaltsorte vieler Wassertiere mehr und mehr ein, wofür die Neuanlage zahlreicher Teiche nur teilweisen Ersatz schafft. Das Plankton erreicht nach Masse und Artenzahl hier seine größte Reichhaltigkeit, besonders in seichteren an gelösten organischen Stoffen reichen Gewässern: Cyanophyceen, Diatomeen, grüne und braune Flagellaten, Rotatorien und Crustaceen sind besonders zahlreich, teils perennierend, teils auf den Sommer oder seltener auf den Winter beschränkt. Parthenogenese überwiegt, sexuelle Fortpflanzung tritt nur zu bestimmten Zeiten, meist im Herbst, bisweilen daneben auch im Frühling auf. Die Seen Mitteleuropas im Bereich der großer diluvialen Vergletscherungen haben eine Anzahl eigener Planktonformen, besonders Crustaceen wie Bosmina coregoni, Bythotrephes, Heterocope, gewisse Diaptomusarten bewahrt, die dem in der Glazialzeit eisfreien Gebiete fast völlig fehlen; ähnliche Verbreitung zeigen die Coregonen. Von Fischen sind die Störe, Salmoniden, Esociden, Gasterosteiden für die nördlich gemäßigten Regionen charakteristisch, ebenso die Urodelen; von Crustaceen sind die Astaciden auf die nördliche Erdhälfte beschränkt. Unter den Mollusken überwiegen die Limnaeen und Planorben; die Unionen sind in Europa in nur wenigen Arten aber in zahllosen Lokalformen vertreten, desto zahlreicher aber in Nordamerika.

Die Länder um das Mittelmeer bilden eine eigene Subregion, die eine Anzahl Formen von tertiärem Gepräge bewahrt hat und mannigfache Anklänge an die Tropen zeigt (Melaniiden, Atyiden, Potamiden, Cyprinodonten, Cichliden usw.). Für das Plankton sind eine Anzahl speziell mediterraner Diaptomus-Arten charakteristisch. Eine durchaus eigenartige und altertümliche Fauna besitzt Nordamerika in seinen Süßwasserschildkröten, Perennibranchiaten, Knochenganoiden, Amiuriden, Catostomiden, in seiner Fülle an Unionen, Strepomatiden, Cambariden usw. Im Plankton tragen die zahlreichen Diaptomusarten autochthonen Charakter, während die Cladoceren fast völlig denen Europas gleichen. In Asien erhielten sich in dem eisfrei gebliebenen Japan sowie in dem östlichen China zahlreiche tropisch anmutende tertiäre Typen.

C. Tropische Regionen. Die Gewässer der eigentlichen Tropen bewahren das ganze Jahr hindurch eine gleichmäßig hohe Temperatur; die Vegetation erreicht hier ihre höchste Entfaltung und perenniert. Sehr beträchtlich ist namentlich in Steppengebieten die Zahl der periodischen Gewässer, welche die Regenzeit mit einer reichen Tierwelt füllt. Das Plankton erlangt nach den bisher vorliegenden Befunden kaum jemals den Art- und Individuenreichtum der gemäßigten Zonen; auch die Körpergröße der Planktonten scheint im allgemeinen etwas geringer zu sein als bei uns. Im Phytoplankton überwiegen Cyanophyceen und Diatomeen, unter den Tieren kosmopolitische eurytherme und besonders thermophile Rotatorien sowie Crustaceen von meist tropischem Charakter. Die Gattung Diaptomus besitzt eigene Arten in Südamerika, in Afrika sowie in Südasien-Australien; dasselbe gilt unter den Daphniden von den bei uns als Sommerformen auftretenden Gattungen Diaphanosoma, Moina und Ceriodaphnia. Die Periodi-

zität dieser Organismen scheint in erster Linie durch den Cyclus der Fortpflanzung bedingt zu sein. Recht beträchtlich ist in den Tropen die Zahl der vom Meere in das Süßwasser eingedrungenen Tiere, was wohl mit dem hohen geologischen Alter und der durch keine Eiszeit gestörten Entwickelung dieser Fauna zusammenhängt. Charakteristisch für tropische Gewässer sind die Krokodile, Wasserschlangen, zahlreiche Schildkröten, die aglossen Batrachier, von Fischen die Dipnoer, die Characiden, Labyrinthfische, Cichliden, Cyprinodonten, die außerordentliche Entwickelung der Siluriden sowie der Gattung Barbus; von Mollusken gehören die Ampullarien, die Melanien, Aetherien, Byssanodonten, von Insekten die Belostomiden, von Crustaceen die Potamiden (Telphusa) und Atyiden hierher.

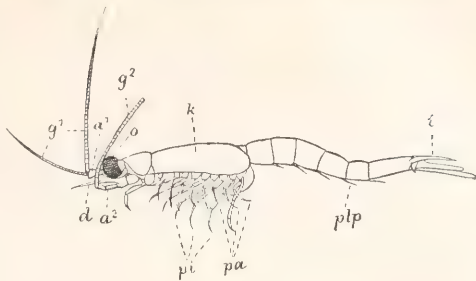
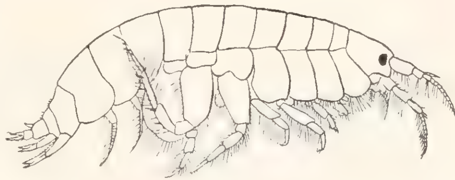
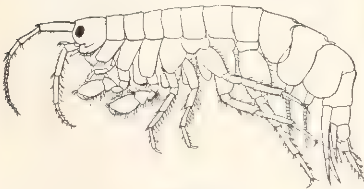


Fig. 19.


Fig. 20.

D. Außertropische Südhemisphäre. Die geringe Entwickelung der Landmassen und damit des Süßwassers sowie unsere unzureichenden Kenntnisse der niederen Tierwelt gestatten uns die Fauna der südlich gemäßigten wie der antarktischen Region hier einstweilen als diejenige der außertropischen Südhemisphäre zusammenzufassen. Charakterformen dieser Region sind unter den Fischen die Galaxiiden und Haplochitoniden, die auf die Südspitze von Amerika, Afrika und Australien sowie Neuseeland beschränkt sind und dort die nordischen Esociden und Salmoniden vertreten. Von Mollusken sind die Chiliniden, von Crustaceen die Parastaciden, die Phreatoiciden, die Amphipodengattungen Neoni-


Fig. 21.

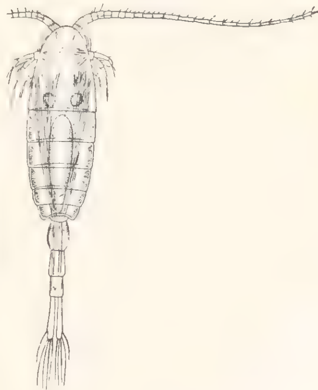

Fig. 22.

Fig. 19 bis 22: Relikte Krebse nordischer Seen. Nach Brauers Süßwasserfauna.

Fig. 19. Mysis relicta.
Fig. 20. Pontoporeia affinis.
Fig. 21. Pallasea quadrispinosa.
Fig. 22. Limnocalanus macrurus. Nach Steuers Planktonkunde.

phargus, Chiltonia und Paracalliope, weiter die Diaptomiden Boeckella, Pseudoboeckella, Parabroteas (Gigantella) auf die Südhemisphäre beschränkt; Pseudoboeckella Entzi ist selbst in die eigentliche Antarktis vorgedrungen als bis jetzt südlichster Pionier der ständigen Süßwasserfauna.

4. Reliktenseen. Von hohem tiergeographischen Interesse sind die sogenannten Reliktenseen: Süßwasserbecken mit Tieren von ausgesprochen marinem Habitus. In Europa gehören hierher Seen in Skandinavien, Finland, Nordrußland und Norddeutschland, mit Cottus quadricornis, Mysis relicta, Idothea entomon, Gammaracanthus loricatus, Pallasea quadrispinosa, Pontoporeia affinis, Limnocalanus macrurus als Charakterformen (Fig. 19—22). Der Fisch und die Krebse haben ihre nächsten Verwandten hauptsächlich im nördlichen Eismeer und waren allem Anschein nach bereits Bewohner des kalten Yoldiameeres, das am Ende der Eiszeit das Gebiet der heutigen Ostsee von Norden her überflutete. Als dann durch Landerhebungen im Norden diese Bucht vom Eismeer getrennt, durch Schmelzwasserströme ausgesüßt und in einen riesigen Binnensee, den sogenannten Ancylussee umgewandelt wurde, paßten sich, wie man annimmt, jene Formen dem Süßwasser an und zwar derart, daß beim späteren Eindringen des Meeres von Westen her zur Litorinazeit sie sich vor dem zunehmenden Salzgehalt in die angrenzenden Binnenseen zurückzogen, wo sie sich bis auf den heutigen Tag erhielten. Mysis relicta und Pontoporeia affinis bewohnen auch die großen Kanadischen Seen.

Das großartigste Beispiel eines Reliktensees auf der ganzen nördlichen Halbkugel bietet der Baikalsee in Sibirien, ein gewaltiges Becken von 640 km Länge, 40 km Breite und bis zu 1430 m Tiefe. Mit seinem klaren und kühlen, von Stürmen und Strömungen bewegten pflanzenarmen Wasser, mit seinen steil abfallenden Ufern und felsigen Gestaden bietet der Baikal ganz das Bild eines alpinen Sees dar und ist wie diese im Winter monatelang von einer dicken Eisdecke überzogen. Seine Fauna ist eine höchst eigentümliche: kein zweites Süßwasserbecken besitzt so viele durchaus endemische Gattungen mit einer solchen Fülle an eigentümlichen Arten. Zunächst lebt hier ein Seehund, Phoca baicalensis, der nordischen Phoca annulata verwandt. Von Fischen finden sich neben weitverbreiteten sibirischen Lachsen und Coregonen zwei Arten der eigentümlichen Gattung Comephorus, ausgeprägte Tiefseeformen, weiter mehrere Gattungen der Cottiden (Asprocottus, Abyssocottus, Limnocottus, Cottomephorus). Unter den Mollusken sind Choanomphalus, Baikalia, Liobaikalia, Maackia, Gerst-

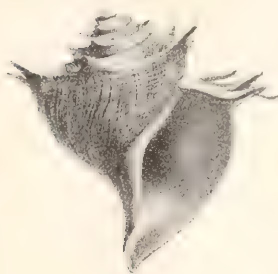


Fig. 23.



Fig. 24.



Fig. 25.



Fig. 26.



Fig. 27.

Fig. 23 bis 27. „Halolimnische" Schnecken des Tanganjikasees. Nach Bourguignat. Fig. 23. Tiphobia Horei. Fig. 24. Limnotrochus Kirki. Fig. 25. Lavigeria diademata. Fig. 26. Paramelania Damoni. Fig. 27. Tanganikia Fagotiana.

feldia, und dann besonders Benedictia in zahlreichen Arten vertreten; das von hier gemeldete, Vorkommen eines Opisthobranchiers (Ancylodoris baicalensis) ist das einzige im ganzen Bereich des Süßwassers. Mehrere hundert Arten von Gammariden, darunter riesige Tiefseeformen von mehreren Zentimetern Länge, verleihen der Crustaceenfauna des Baikal ein besonderes Gepräge; die Gattung Macrohectopus (Constantia) unter ihnen bildet neben einigen Rotatorien und Kleinkrustern den Hauptbestandteil des ärmlichen Planktons. Von Würmern sind vor allem die Trikladen in sehr zahlreichen Arten von oft riesenhaften Dimensionen vorhanden; die Oligochaeten besitzen in der Gattung Lamprodrilus, Teleuscolex, Lycodrilus phylogenetisch sehr alte Typen; Polychaeten sind durch die Sabellide Dybowskyella baicalensis vertreten, während die im Plankton gefundenen Trochophoralarven wahrscheinlich einer weiteren Form angehören. Von Schwämmen sind die riesigen Lubomirskien charakteristisch, deren nächste Verwandten im Behringsmeer leben.

Unter diesen Tieren tragen Phoca, Ancylodoris, Dybowskyella, die Lubomirskien ein durchaus marines Gepräge. Ihnen stehen Formen gegenüber, die ebenso entschiedene Süßwasserbewohner sind, so außer den Trikladen vor allem die oben genannten Oligochaeten, welche den ursprünglichen Charakter der Lumbriculiden und Tubificiden hier fast unverändert beibehalten haben. Unter diesen Umständen ist es sehr beachtenswert, daß im Bereich des Baikalsees gar keine marinen Ablagerungen bekannt geworden sind: nach Ansicht der Geologen stand der See seit dem Devon nicht mehr mit dem Meer in unmittelbarer Verbindung. Das stützt die Auffassung, daß der Baikalsee ein uraltes Süßwasserbecken darstellt, das, kaum berührt von geologischen Umwälzungen, anderwärts längst verdrängte Tiertypen bewahrte und nur wegen der ungeheuer langen Dauer seines Bestehens mehr marine Elemente aufnahm als andere vergänglichere Gewässer.

Ein tropisches Gegenstück zum Baikal bildet der Tanganjikasee, in der großen zentralafrikanischen Grabensenke gelegen, mit 35000 Quadratkilometer Oberfläche und Tiefen bis zu 650 m. Die oberen Schichten des wie der Baikal von Wellen und Strömungen meist stark bewegten Sees beherbergen weit verbreitete afrikanische Typen, von Fischen zahlreiche Cichliden, von Crustaceen Potamiden, von Mollusken Vertreter der Gattungen Cleopatra, Ampullaria, Lanistes, Mutela, Pseudospatha, Pliodon, Corbicula usw. von Medusen die in Afrika weiter verbreitete Limnocnida tanganjicae. In der Tiefe dagegen lebt eine dem Tanganjika durchaus eigentümliche Molluskenfauna, die man wegen ihres marinen Gepräges als „halolimnisch“ bezeichnet hat (Fig. 23 bis 27). Es sind durchweg Prosobranchier, von denen Spekia zur Familie der Natididen, Tanganikia zu den Planaxiden, Paramelania, Lavigeria (Nassopsis), Bythoceras zu den Purpuriniden, Chytra zu den Xenophoriden gehören; Tiphobia, Bathanalia und Limnotrochus bilden eine eigene Familie der Tiphobiiden. Manche dieser Schnecken haben eine gewisse Aehnlichkeit mit jurassischen Formen. Auf jeden Fall handelt es sich auch hier um sehr alte Typen, die sich wohl schon sehr frühe dem Leben im Süßwasser angepaßt haben und in dem tiefen und anscheinend auch sehr alten See den Wechsel ganzer geologischer Epochen überdauerten.

Literatur. *Allgemeines:* ***H. Simroth***, *Die Entstehung der Landtiere. 1891.* — ***K. Knauthe***, *Das Süßwasser. 1907.* — ***K. Lampert***, *Das Leben der Binnengewässer. 2. Aufl., 1910.* — *Bestand der Süßwasserfauna:* ***A. Brauer***, *Die Süßwasserfauna Deutschlands. 20 Hefte, 1909—1913. Für außereuropäische Gebiete zahlreiche Angaben in Cambridge Natural History besonders Vol. III: Mollusks, Vol. IV: Crustacea, Vol. V und VI: Insects, Vol. VII: Fishes, Vol. VIII: Amphibia, Reptilia. Weiter* ***M. Rauther***, *Fische,* ***F. Werner***, *Amphibien und Reptilien, beide in Sammlung Göschen.* — *Lebensbezirke der Süßwasserfauna. Quellen:* ***K. Bornhauser***, *Die Tierwelt der Quellen in der Umgebung Basels. In: Internat. Revue d. Hydrobiologie u. Hydrographie. Biol. Suppl.* 5, *S. 1—90, 1912.* — *Bäche:* ***P. Steinmann***, *Die Tierwelt der Gebirgsbäche. In: Ann. Biol. lacustre, Vol. II (1907), S. 30—150.* — ***A. Thienemann***, *Der Bergbach des Sauerlandes. In: Internat. Revue Hydrobiologie und Hydrographie Suppl. 1912, S. 1—127.* — *Flüsse:* ***R. Lauterborn***, *Ergebnisse der biolog. Untersuchungen des Oberrheins. In: Arbeiten aus dem Kaiserl. Gesundheitsamt, Bd.* 22, 25—36, *1905, 1907—1910.* — ***M. Marsson***, *Ibidem. 1907—1910 (Mittelrhein).* — ***R. Volk***, *Hamburgische Elbuntersuchungen. In: Mitt. Naturhist. Museum Hamburg, Bd.* 18 *bis* 25, *1901—1908.* — *Seen:* ***A. Forel***, *Le Léman. 1892—1908.* — ***F. Zschokke***, *Die Tierwelt der Hochgebirgsseen. Neue Denkschriften Schweiz. Gesellsch. f. Naturwiss., Bd.* 37, *1900.* — ***C. Wesenberg-Lund***, *Die litoralen Tiergesellschaften unserer größeren Seen. In: Internat. Revue d. Hydrobiologie u. Hydrographie, Bd.* 1, *1908.* — ***F. Zschokke***, *Die Tiefseefauna der Seen Mitteleuropas. 1911.* — *Plankton:* ***A. Steuer***, *Planktonkunde. 1910.* — *Teichgewässer:* ***O. Zacharias***, *Ueber das Plankton der Teichgewässer. Forschungsber. Biol. Station Plön, Bd.* 6, *1898, S. 89—139.* — *Sapropelische Lebewelt:* ***R. Lauterborn***, *Die sapropelische Lebewelt. In: Zoolog. Anzeiger, Bd.* 24, *1901. S. 49—55.* — ***Kolkwitz und Marsson***, *Oekologie der tierischen Saprobien. In: Internat. Revue d. Hydrobiologie u. Hydro-*

graphie, Bd. **2**, *1909, S. 126. — Moore:* **G. Schlenker**, *Geologisch-biologische Untersuchungen in Torfmooren. In: Mitteil. Geol. Abteilung d. Württ. Stat. Landesamts, 1908. — Höhlengewässer:* **E. G. Racovitza**, *Essai sur les problèmes biospéologiques. In: Archives Zoologie experimentale, IV Serie, T. VI, 1902, S. 371. —* ***Zeitschriften:*** *Annales de Bioloie lacustre 1906 f. — Archiv für Hydrobiologie 1906 f. — Forschungsberichte der Biol. Station Plön, I—XII, 1893—1905. — Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie, seit 1908.*

R. Lauterborn.

Swammerdam

Jan.

Geboren am 12. Februar 1637 in Amsterdam, gestorben am 15. Februar 1685 daselbst. Widmete sich seit 1661 in Leiden und Paris der Medizin und promovierte 1667, ohne aber jemals eine Praxis auszuüben. Er lebte in Amsterdam ausschließlich seinen anatomischen, besonders entomologischen Studien. In seinem späteren Leben wurde er von einer pietistisch-schwärmerischen Stimmung ergriffen; er vertiefte sich immer mehr in die Schriften der religiösen Schwärmerin Bourignon und ging 1675 zu ihr nach Schleswig, geleitete sie nach Kopenhagen und kehrte krank nach Amsterdam zurück. Schon vorher hatte er durch zu angestrengten Fleiß seiner Gesundheit arg zugesetzt, so daß er schließlich in tiefe Hypochondrie verfiel. — Swammerdam hat sich besonders verdient gemacht durch anatomisch-zootomische Untersuchungen an kleinen wirbellosen Tieren, besonders Insekten, zu denen er selbstverfertigte optische Instrumente benutzte. Er war der erste, der die Blutgefäße durch die Injektionsmethode der Untersuchung zugänglich machte. In seiner „Allgemeene verhandeling van bloedeloose diertjens" (Utrecht 1669; lateinisch Leiden 1685) legte er die Grundlage für die erste naturgemäße Klassifikation der Insekten, besonders zog er die verschiedene Art der Metamorphose der Insektenentwickelung zur Systematik heran, eine Methode, die noch heute gebräuchlich ist. Seine anatomischen Arbeiten über die Insekten, die in der „Biblia naturae sive historia insectorum in certas classes redacta usw." (herausgegeben von Boerhaave, Leiden 1737 bis 1738 2 Bde.; deutsch Leipzig 1752) veröffentlicht wurden, sind die bedeutendsten auf dem Gebiete der Zootomie bis in die neuere Zeit geblieben. Von seinen Schriften sind sonst noch zu nennen „Miraculum naturae, seu uteri muliebris fabrica" (Leiden 1672), „Afbeelding van's Menschen leven vortoont in de haft" (Amsterdam 1675; lateinisch London 1681). Einen Teil seiner Papiere hat er vor seinem Tode verbrannt, einen anderen aus Mangel verkauft. Letztere gelangten ein halbes Jahrhundert später in die Hände Boerhaaves, der sie unter dem Titel der eben erwähnten Biblia naturae veröffentlichte. Die Zeugungs- und Entwickelungsgeschichte hat Swammerdam namentlich durch seine Studien über das Urogenitalsystem der Frösche und seine Befruchtungsexperimente an Amphibien gefördert. Vor allen Dingen stellte er so die nur befruchtende Rolle des Samenfadens fest, wodurch er dazu beitrug, die Bedeutung der beiderseitigen Zeugungsprodukte zu klären.

Literatur. ***Boerhaave***, *Vorrede in Biblia naturae. —* ***Cuvier***, *Hist. des sciences naturelles, t. II. Nouvelle Biographie générale. Tom. 43, 1804. —* ***Carus***, *Geschichte der Zoologie, München 1872. —* ***Burckhardt***, *Geschichte der Zoologie, Leipzig 1907.*

W. Harms.

Sylvius

Franciscus de le Boë.

1614 bis 1672, seit 1658 ordentlicher Professor der inneren Medizin in Leiden, vorher 19 Jahre lang Arzt in Amsterdam. Er wurde in Hanau geboren, wohin sich die Eltern, eine protestantische Familie aus Cambrai aus konfessionellen Rücksichten geflüchtet hatten, studierte auf deutschen und holländischen Universitäten, promovierte in Basel, praktizierte anfangs in Hanau, vervollkommnete sich weiter in Paris und Leiden, wo er eine Zeitlang dozierte. Er ist eines der Häupter der chemiatrischen Schule, deren Vertreter Sitz und Wesen der pathologischen Erscheinungen mit den Gesetzen der Chemie in Einklang zu bringen suchten im Gegensatz zu den Jatrophysikern, die mehr mechanische Vorgänge zur Erklärung heranzuziehen bestrebt waren. Uebrigens war Sylvius ein außerordentlich klarer Lehrer. Sein Methodus medendi betiteltes Hauptwerk erschien erst nach seinem Tode. Es liest sich noch heute vorzüglich und enthält auch die erste gute Beschreibung der Tuberkulose (deutsche Ausgabe von Oscar Seyffert Berlin 1907).

Literatur. *Biogr. Lex. ed.* ***Hirsch.***

J. Pagel.

Symbiose.

a) Tier und Alge. Tier und Tier. b) Flechten. c) Zusammenleben von höheren Pflanzen mit Pilzen und Bakterien.

a) Tier und Alge. Tier und Tier.

1. Begriffsumgrenzung. Arten und Folgeerscheinungen der Symbiose. Historisches. 2. Symbiosen zwischen tierischen und pflanzlichen Organismen: a) Protozoen und niedere Metazoen mit Algen. α) Vorkommen und Verbreitung. β) innere (physiologische) Beziehungen. b) Insekten mit Bakterien und Hefepilzen. c) Ameisen und höhere Pflanzen. 3. Symbiosen zwischen verschiedenen Tierarten: a) Bei einzellebenden Tieren. b) Bei sozialen Tieren. α) Trophobiose bei Ameisen.

β) Synökie und Symphilie bei Ameisen und Termiten. *γ*) Sklaverei bei Ameisen.

1. Begriffsumgrenzung. Arten und Folgeerscheinungen der Symbiose. Historisches. Mit dem Begriff Symbiose (in engem Sinne) werden jene Fälle gekennzeichnet, in denen sich Organismen verschiedener Art zu einem dauernden gesetzmäßigen Zusammenleben verbinden und zwar in der Weise, daß eine Förderung der beiderseitigen Lebensinteressen stattfindet. Die Individuen, welche auf Grund eines solchen Gegenseitigkeitsverhältnisses sich aneinander angeschlossen haben, heißen Symbionten. Man kann Ekto- und Entosymbionten unterscheiden, je nachdem die Verbindung äußerlich und oberflächlich stattfindet oder die eine Partei sich in inneren Gewebsteilen der anderen aufhält (extrazelluläre-intrazelluläre Symbiose). — Beispiele echter Symbiose sind in der Tier- und Pflanzenwelt nicht gerade häufig; meist sind die Individuen in bezug auf ihre persönliche Erhaltung wie auf die Erhaltung der Art auf sich selbst angewiesen; die einzelnen Formen stehen sich je nach ihren Lebensbedingungen feindlich oder gleichgültig gegenüber. — Eine Symbiose kann gebildet werden von verschiedenen Pflanzen unter sich, von verschiedenen Tieren unter sich, oder endlich von Tieren und Pflanzen, die zu einer Gemeinschaft zusammentreten. Die Symbionten müssen zunächst ungleichartig sein, d. h. sie müssen verschiedenen Arten oder Abteilungen des Tier- oder Pflanzenreichs angehören. Insofern steht die Symbiose im Gegensatz zum Sozialismus, zur Staatenbildung, bei der sich Individuen einer Art vereinigen. Maßgebend für die Beurteilung, ob eine echte Symbiose vorliegt, ist ferner die Gesetzmäßigkeit der Verbindung, die zuweilen soweit geht, daß ein Symbiont gar nicht oder kaum ohne den anderen vorkommt und bestehen kann. Endlich muß das Verhältnis zu einem gegenseitigen Nutzen führen; hierin zeigt sich der Unterschied der Symbiose vom Parasitismus (s. dort), der nur einseitig fördernd wirkt. — In dem Nutzfaktor liegt für uns die Hauptschwierigkeit der Entscheidung, ob wir das Verhältnis zweier Arten zueinander als echte Symbiose bewerten sollen. Vom Standpunkt unserer heutigen physiologischen Kenntnisse aus ist es zuweilen geradezu unmöglich, zu beurteilen, worin ein Nutzen oder Schaden für die eine oder die andere Art besteht, und ob durch das Zusammenleben eine Förderung beider Parteien erreicht wird. Diese Schwierigkeit bringt es mit sich, daß wir in der Literatur vielfach den Begriff Symbiose in bedeutend weiterem Sinne angewandt finden, wie die hier gegebene Definition zuläßt. Er umfaßt dann eine ganze Reihe von Erscheinungen, welche Zwischenstufen zwischen Parasitismus einerseits und echter Symbiose andererseits darstellen und welche wiederum ineinander übergehen können. Eine solche Zwischenstufe ist z. B. die Synökie, zwar gleichfalls eine oft recht innige Vergesellschaftung zweier oder mehrerer verschiedener Arten, bei der jedoch im allgemeinen nur eine Partei in ihren Lebensbedingungen gefördert wird, während die andere ohne eigenen Nutzen (wie bei der Symbiose) oder Schaden (wie beim Parasitismus), jener irgendeinen Vorteil gewährt. Zuweilen kann aber auch, wie wir unten sehen werden, der Fall eintreten, daß Parasitismus, Synökie und Symbiose sich unmittelbar berühren; so zwar, daß beide Teile einen gewissen gegenseitigen Nutzen oder Vorteil genießen, außerdem aber in anderer Beziehung der eine Teil seinem Gesellschafter direkt oder indirekt Schaden zufügen kann.

Für alle die lockeren oder festen Gegenseitigkeitsbeziehungen von Tieren untereinander, welche dem einseitigen Verhältnis des eigentlichen Parasitismus entgegengesetzt sind, prägte van Beneden den Ausdruck Mutualismus. Die Symbiose im engen Sinn stellt einen besonders ausgesprochenen Fall des Mutualismus dar, bei welchem die Abhängigkeit der Symbionten voneinander einen sehr hohen Grad erreicht und oft zu Organisationsänderungen wenigstens eines Symbionten führen kann.

Das Wort „Symbiose" wurde von de Bary (1879) eingeführt, und zunächst im botanischen Wissensgebiet auf den zusammengesetzten Aufbau der Flechten angewandt, die durch das innige Wechselverhältnis von Pilzfäden und Algen entstehen. O. und R. Hertwig u. a. brachten den Ausdruck bald darauf auch für die Zoologie zu sinngemäßer, allgemeiner Anwendung, nachdem es ihnen gelungen war, festzustellen, daß nicht nur zwischen verschiedenen Tierformen, sondern auch zwischen tierischen und pflanzlichen Organismen tiefgreifende, stetige Wechselbeziehungen vorkommen.

Die Grundlage der symbiontischen Vereinigungen beruht meist auf einer leichteren Befriedigung des Schutzbedürfnisses, des Wohnungsbedürfnisses oder des Nahrungsbedürfnisses, oder in einer Erleichterung der Ortsveränderung; häufig treffen mehrere dieser Faktoren zusammen. — Beide Symbionten können aktiv vorgehen, um ein Zusammenleben zu erreichen, oder nur einer derselben ergreift die Initiative, der andere verhält sich passiv. — Als Folge- oder schon als Begleiterscheinungen der echten Symbiose treten vielfach morpho-

logische oder histologische Umformungen und Neuerwerbungen auf, wie wir sie, allerdings in weit höherem Maße bei den Anpassungen der Parasiten beobachten; hier wie dort werden in extremen Fällen so tiefgreifende Veränderungen hervorgebracht, daß die systematische Stellung eines Symbionten gänzlich verschleiert erscheinen kann.

2. Symbiosen zwischen tierischen und pflanzlichen Organismen. 2a) Protozoen und niedere Metazoen mit Algen. α) Vorkommen und Verbreitung. Im Plasma bezw. in gewissen Geweben einer sich beständig mehrenden Zahl von niederen Tieren werden etwa seit der zweiten Hälfte des verflossenen Jahrhunderts von Huxley u. a. eigentümliche, meist kugelige Gebilde genauer beobachtet, welche man zunächst für wesentliche Körperbestandteile oder für Stoffwechselerzeugnisse des Tieres hielt. In der Folgezeit wurde festgestellt, daß die kugeligen Körper in zwei Modifikationen, als grüne oder als gelbe Zellen vorkommen und echtes Chlorophyll enthalten. 1870 sprach Cienkowski die gelben Zellen als lebende Algen an, eine Ansicht, welche später von O. und R. Hertwig, Brandt, Geza Entz u. a. für grüne und gelbe Zellen bewiesen wurde. — Nach der Färbung

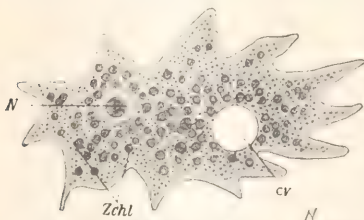


Fig. 1. Amoeba viridis Leidy. N Kern. Zchl Zoochlorellen. Nach Gruber.

bezeichnet man erstere, welche durchweg zu den Protococcaceen gehören, als Zoochlorellen, letztere, die aus verschiedenen Organismengruppen herzustammen scheinen, als Zooxanthellen.

Bei den Protisten liegen die kugeligen bis ovalen Algen in wechselnder Zahl vorwiegend im Entoplasma. — Zooxanthellen sind bei Radiolarien, Foraminiferen, Ciliaten und Flagellaten, Zoochlorellen bei Amöben, Heliozoen und ebenfalls bei Foraminiferen (besonders bei Monothalamiern), Flagellaten und Ciliaten bekannt geworden. In sehr vielen Fällen liegt eine gesetzmäßige Symbiose vor, insofern man in allen Individuen derselben Protozoenart stets die gleiche Art von Algenzellen findet; mitunter können letztere nicht mehr außerhalb ihres Wirtes leben, da infolge der Symbiose sich Rückbildungserscheinungen zeigen, Verschwinden der ursprünglichen Membran u. dgl.

Unter den niederen Metazoen kennen wir das Vorkommen von Zooxanthellen oder Zoochlorellen bei vielen Spongien und Cnidarien, bei einzelnen Würmern, Echinodermen und Muscheln. In den beiden letzteren Gruppen ist es, soweit bekannt, nur ein gelegentliches, nicht regulär symbiontisches. — Die Spongien nehmen insofern eine Ausnahmestellung ein, als bei ihnen nicht nur einzellige gelbe oder grüne, sondern auch mehrzellige, rote, violette, braune oder grüne Algen als Mitbewohner gefunden wurden. Diese Algen leben ferner entweder extrazellulär oder intrazellulär bei ihren Wirten, und zwar sowohl bei zahlreichen Meeresschwämmen wie bei denen des Süßwassers; sie gehören zu den Florideen, Cyanophyceen, Chlorophyceen und anderen Abteilungen. Die Beziehungen zwischen Schwamm und Alge sind noch wenig erforscht; jedenfalls beeinflussen beide sich häufig wechselweise im Bau. Eine engere gesetzmäßige Verbindung ist bisher nur in einzelnen Fällen als wahrscheinlich angenommen, z. B. bei Reniera fibulata mit Spongocladia vaucheriaeformis und mit Marchesettia, bei Halichondria mit Struvea delicatula, bei Ephydatia fluviatilis mit Cladophora und Trentepholia. — Unter den Nesseltieren zeigen sich manche Hydrozoen, Hydrocorallen (Millepora), zahlreiche Anthozoen (u. a. Actinia, Gorgonia, Adamsia) und eine Ctenophore (Euchlora) stets mit einzelligen Algen vergesellschaftet, und zwar kommen letztere intrazellulär im Entoderm vor. Durch ihre riesige Zahl verleihen sie dem Wirt meist ihre Farbe (z. B. Hydra viridis). — Die gleiche Erscheinung tritt bei den wenigen Würmern zutage, in deren Körper man bisher Zoochlorellen oder Zooxanthellen fand: bei den Turbellarien Convoluta roscoffensis (grün), Convoluta paradoxa, Langerhansi und bimaculata (gelbbraun), sowie bei Mesostomum viridatum (grün). Die Algen liegen hier in dichten Gruppen oder Reihen unmittelbar unterhalb der Epidermis im Parenchym oder seltener in den tieferliegenden Geweben.

β) Innere (physiologische) Beziehungen. Während es sich beim Vorhandensein von lebenden Algen in oder an tierischen Geweben oft nur um einen Raumparasitismus oder gar um echten Parasitismus handelt, unterliegt es keinem Zweifel, daß wir in den meisten bisher genannten Fällen echte Symbiosen zu erblicken haben. Es ist naheliegend, daß aus anfänglichem Raumparasitismus ein Mutualismus und schließlich eine Symbiose hervorgehen konnte. Von grundlegender Bedeutung für deren Zustandekommen ist die gegenseitige Er-

gänzung des Stoffwechsels bei Pflanze und Tier; jene ist ein Reduktions-, dieses ein Oxydationsorganismus. Die chlorophyllhaltigen Algen erhalten im Körper der oben erwähnten meist durchsichtigen Wassertiere reichliches Licht zur Assimilation, außerdem steht ihnen Wasser und Kohlensäure seitens des Wirtstieres zur Verfügung. Nach Pütter liefern die Aktinien ihren Zooxanthellen Stickstoff in Form von Ammoniak zur Eiweißsynthese und geben ihnen besonders in der Dunkelheit auch stickstofffreie Kohlenstoffverbindungen. Für die Algen ist ferner der Aufenthalt in den Wirten wegen des gebotenen Schutzes von Vorteil, vornehmlich, wenn das Tier, wie Hydra oder die Anthozoen, über Nesselbatterien oder sonstige Abwehrmittel gegen Feinde verfügt. Andererseits bringen die Algen ihren Wirten bedeutenden Nutzen, dem nur mitunter eine geringe Schädigung zur Seite treten kann. — Sie schaffen sich im allgemeinen keine Reservestoffe — selten wurden größere Mengen von Stärke in ihnen wahrgenommen — sondern geben alle Ueberschüsse in gelöster Form an das Tier ab.[1]) Sie versehen dasselbe ferner mit Sauerstoff zur Atmung. — Mit Algen behaftete Tiere können daher ungünstigen Lebensbedingungen, einer Hungerperiode oder dem Aufenthalt in verunreinigtem Medium besser und länger widerstehen wie algenfreie Individuen (Gruber u. a.). Manche der genannten Wirte schädigen ihrerseits die Algen, indem sie dieselben in Hungerzeiten als Nahrung benutzen. Bei einigen Protozoen und bei Convoluta ist das sicher nachgewiesen; bei Hydra dagegen können die Algen nicht verdaut werden. Bei Convoluta ist die symbiontische Verbindung eine derart enge, daß junge algenfreie Tiere sich nicht entwickeln können; andererseits werden die aufgenommenen Algen hier physiologisch ein Teil des Wirtes und unfähig einer selbständigen Existenz. — Schließlich spielen die Algen eine phototaktische Rolle, indem mit ihnen infizierte Tiere viel energischer auf Lichtstrahlen reagieren, was wiederum einen Vorteil für beide Parteien bedeutet.

Die Wege, auf welchen die Algen in das Tier gelangen, sind verschiedene. Bei Hydra wird bereits das Ei von Zoochlorellen bezogen, indem dieselben vom Entoderm her die Stützlamelle durchbrechen; bei den weiblichen Medusen von Millepora dringen die Zooxanthellen ähnlich wie bei Hydra ins Ei ein (J. Mangan 1909); bei Convoluta findet eine Einwanderung der Algen erst in jungen Larvenstadien statt, worauf eine rasche Vermehrung erfolgt.

2b) Insekten mit Bakterien und Hefepilzen. Bei einer großen Anzahl von Insekten wurden neuerdings in verschiedenen Körperregionen stäbchenförmige bis elliptische Gebilde bekannt, deren Natur und Verhalten vorläufig nur bei Hemipteren, Hymenopteren und Blattiden genauer erforscht ist. Demnach handelt es sich um eine echte Symbiose zwischen Blattiden und Hymenopteren mit Bakterien einerseits, sowie zwischen Hemipteren mit mutmaßlichen Hefepilzen andererseits. Die kleinen Organismen dringen schon in die noch in den Eiröhren des Muttertieres befindlichen jüngeren oder älteren Eistadien ein und bilden im reifen Ei eine körnige Masse (Pseudovitellus). Im Laufe der weiteren Entwickelung machen sie komplizierte Wanderungen, um sich schließlich in Fettzellen oder im Fettkörper der Larve festzusetzen und sogenannte Mycetocyten oder Bakteriocyten zu bilden. Von diesen aus erfolgt dann beim erwachsenen Tier nach einer Reihe verwickelter Vorgänge die Neuinfektion der Geschlechtsprodukte. — Daß eine Symbiose vorliegt, läßt sich zunächst daraus schließen, daß ausnahmslos alle untersuchten Tierindividuen, aus welcher Gegend sie stammen mögen, vom Ei ab Pilze beherbergen, ohne daß ein schädigender Einfluß wahrzunehmen ist. Ferner hat jede Art auch ihre ganz spezielle Art von Symbionten (eventuell mehrere Arten zugleich), Tatsachen, die eine hochgradige Gesetzmäßigkeit beweisen und geradezu

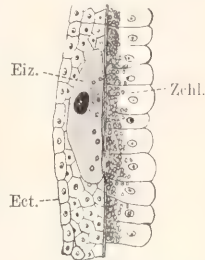


Fig. 2. Eindringen von Zoochlorellen in eine Eizelle von Hydra. Nach Kraepelin.

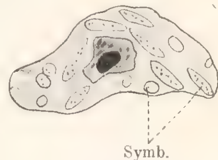


Fig. 3. Fettzellensymbionten einer Coccide. Nach Buchner.

[1]) Nach Pütter wird der Aktinie von ihren Algen durch gelöste Assimilate der ganze Bedarf an Stickstoff, sowie im Licht der gesamte Kohlenstoffbedarf geliefert; im Dunkel werden von dem Tiere organische stickstofffreie Substanzen aus dem Seewasser resorbiert und sollen im Verein mit den Algenassimilaten die Aktinien von Zufuhr geformter Nahrung unabhängig machen.

eine systematische Charakterisierung darstellen (Buchner). Die Pilze genießen fraglos im Wirte Schutz gegen schädigende Einflüsse der Atmosphäre, Wohnung und Nahrung. Die ungeheure Vermehrung der Wirte (Aphiden, Cocciden u. dgl.) kommt auch der Ausbreitung und Vermehrung der Symbionten zunutze. Der Vorteil der Pilze und Bakterien für das Insekt dürfte sich u. a. auf den Stoffwechsel desselben beziehen: Abbau von Uraten u. dgl. (Sulc), enzymatische Wirkung, besonders Zerlegung des aufgenommenen Zuckers (Pierantoni). Die Regelmäßigkeit des Zusammenlebens beider Organismen läßt jedenfalls auf eine gegenseitige Unentbehrlichkeit und auf eine hochstehende Symbiose schließen.

2c) Ameisen und höhere Pflanzen. Zahlreiche Beobachtungen von Fritz Müller, Schimper, Beccari u. a. schienen zu beweisen, daß viele Pflanzen, vornehmlich tropische, besondere Einrichtungen erworben hätten, welche nur dazu bestimmt seien, kampflustige Ameisenarten anzulocken und ihnen Wohnung und Nahrung zu bieten; die Ameisen ihrerseits sollten dann als Schutztruppen, in erster Linie gegen andere blattzerstörende Insekten dienen. Neuerdings haben die Untersuchungen von Rettig, H. v. Ihering, Fiebrig u. a. ergeben, daß die Beziehungen zwischen Pflanzen und ihren Ameisen selten so enge mutualistisch-symbiontische sind, wie ehedem angenommen wurde, daß vielmehr meist der Nutzen ausschließlich auf seiten der Ameisen liegt. Demnach seien jene Einrichtungen nicht dazu erworben, Ameisen anzuziehen, sondern dienten vielmehr anderen, uns teilweise noch unbekannten Zwecken. — Als Ameisenwohnungen kommen in Betracht: 1. Ausgebildete Höhlungen oder mit reichem Gewebe ausgefüllte Stamm- oder Zweigabschnitte, welche präformierte Oeffnungen oder Zugänge aufweisen (Randia, Endospermum, Cecropia, Humboldtia, Sapium, Bartheria u. a.). 2. Knollige Auftreibungen mit inneren Gängen und Kammern (epiphytische Rubiaceen: Myrmecodia, Hydnophytum; Farn Lecanopteris u. a.). 3. Schlauch- oder taschenförmige Bildungen mit Zugängen an Blättern oder Stielen (bei Tococa, Myrmedone usw.). 4. Stark vergrößerte oder aufgeblasene Dornen, welche innerlich lockeres Gewebe enthalten (z. B. Acacia fistulosa, spadicigera). — Nahrung wird den Ameisen von einer überaus großen Zahl von Pflanzen in Gestalt extrafloraler Nektarien geboten, ohne daß wir deshalb stets von regelmäßigen engeren Beziehungen sprechen können.[1]) — Besonders spezialisiert erscheinen die von den Cecropien an der Basis der Blattstiele gebildeten „Müllerschen Körperchen“, welche Oele und Eiweißsubstanzen enthalten, sowie die Beltschen Körperchen“ bei Acacia sphaerocephala, welche einzeln an der Spitze jedes Blattfiederchens stehen. Beide bilden die Hauptnahrung der den Baum bewohnenden Ameisen, werden von ihnen abgeerntet und ergänzen sich dann neu.[2]) Vielleicht gehören auch die bei Vitaceen, Piperaceen und vielen anderen Familien vorkommenden Perldrüsen, welche gleich jenen Körperchen reich an Oelen, Zucker und Protein sind, hierhin.

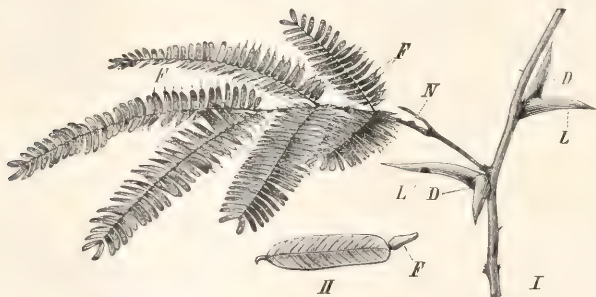


Fig. 4. Acacia sphaerocephala. I Stammstück mit von Ameisen bewohnten Dornen. L Eingang. N Nectarium. F Beltsche Körperchen. II Einzelnes Blattfiederchen mit Beltschen Körpern F. Etwas vergrößert.

Wenn auch nach den neueren Befunden kaum mehr angenommen werden kann,

[1]) Die extrafloralen Nektarien von Centaurea alpina u. a. dienen zweifellos der Ameisenanlokkung zum Zweck des Schutzes durch diese.

[2]) Nach Wheeler sind die Aztecakolonien so abhängig von Cecropia oder von den gebotenen „Müllerschen Körperchen“, daß sie zugrunde gehen, wenn der Wohnbaum abstirbt oder niedergehauen wird.

daß die präformierten Wohnungen und die Nahrungskörper reine Anpassungen der Pflanzen an Ameisen darstellen,[1]) so läßt sich doch andererseits nicht leugnen, daß sehr oft eine weitgehende Zusammengehörigkeit bestimmter Pflanzenarten mit bestimmten Ameisenarten besteht. In sehr vielen Fällen kommen echte Symbiosen zustande, bei denen allerdings den Ameisen wohl größerer Nutzen zufällt wie den Pflanzen. Bei Ameisengattungen, von denen nur einige Arten baumhöhlenbewohnend geworden sind, während die übrigen freie Kartonnester bauen oder erdbewohnend blieben, treten zuweilen schon Anpassungserscheinungen an den relativ neuen Aufenthaltsort auf. Die Gestalt ist verhältnismäßig viel dünner und schlanker (Sima, Pseudomyrma), der Kopf der größeren Arbeiter und der Weibchen ist bedeutend verschmälert (Azteca), Veränderungen, die für das Passieren enger Eingänge und für das Leben in beschränktem Raum sehr in Betracht kommen. — Der Hauptnutzen, den die Ameisen den von ihnen bewohnten Pflanzen bringen, besteht in der Abwehr einer sehr großen Zahl tierischer Feinde. — Nach Keller wird Acacia fistulosa, deren Dornen stets von Cremastogasterarten bewohnt werden, deshalb nie vom Vieh angegriffen. Die wehrhafte Sima aethiops, die gesetzmäßig Bartheria fistulosa bewohnt, verteidigt ihren Strauch gegen jeden fremden Eingriff; Belt gibt an, daß Pseudomyrma bicolor, welche in den Dornen von Acacia sphaerocephala wohnt, bei Berührung des Baumes in Mengen erscheint und mit Biß und Stich gegen Eindringlinge jeder Art kämpft.[2]) Während man bei diesen und vielen anderen wehrhaften, kriegerischen Ameisen von echten Symbionten der Pflanzen reden kann, gibt es andere Baumbewohner unter ihnen, die man eher als Parasiten ansprechen müßte: indolentere Arten, die meist Cocciden- oder Blattlauszucht treiben und dadurch der Wohnpflanze schaden, ganz abgesehen davon, daß sie zu einer Verteidigung fast unfähig sind. Die Ameisenschutz- und Symbiosenfrage läßt sich nicht verallgemeinern, sondern muß von Fall zu Fall beantwortet werden.

[1]) Azteca ist nach Wheeler erst in verhältnismäßig neuer Zeit Cecropia-Innenbewohnerin geworden. Es gibt ferner eine Reihe Cecropiaarten, welche zwar sowohl präformierte Wohnungen wie „Müllersche Körper" besitzen, trotzdem aber stets von Ameisenbewohnern frei sind.

[2]) Belt zog junge Akazien in seinem Garten auf, doch wurden diese, die keine Schutzwache besaßen, von den Blattschneiderameisen (Atta) heimgesucht und entblättert. In der Wildnis sah er niemals, daß eine Akazie von Attaarten beschädigt wurde, wenn sie von Pseudomyrma bewohnt war.

3. Symbiosen zwischen verschiedenen Tierarten. 3a) Bei einzellebenden Tieren. Fälle, welche dem erweiterten Symbiosebegriff zu unterstellen sind, treffen wir vornehmlich bei Wassertieren nicht selten an. Die Gesetzmäßigkeit des Gegenseitigkeitsverhältnisses ist jedoch schwer zu beurteilen, solange wir die Verbreitung der in Betracht kommenden Arten nicht genau kennen, die ja gerade bei Meerestieren sehr bedeutend sein kann. Am längsten und besten sind wir wohl über die typischen Symbiosen der Krabben und Einsiedlerkrebse unterrichtet. Einen Uebergang zu diesen bietet die Gattung Stenorhynchus u. a., welche auf dem Rücken und an den Extremitäten hakig gekrümmte Borsten und sonstige Chitinbildungen besitzen. Mittels dieser halten sie abgepflückte Stücke von Hydroidpolypen, Ascidien, Bryozoen oder Algen fest und werden durch eine derartige Maskierung unsichtbar. Der Nutzen für die aufgesetzten Symbionten ist in diesem Falle noch ziemlich problematisch. — Höher steht bereits die Verbindung der Taschenkrebse Dromia, Cancer usw. mit Schwämmen, Röhrenwürmern, Hydroidpolypen und anderen sessilen Formen, welche auf dem Krabbenrücken festwachsen und vielfach eine zweite Umhüllung um das Tier bilden. Unter deren Schutz kann der Taschenkrebs manchen Gefahren entgehen und sich einer Beute unauffälliger nähern; andererseits werden die seßhaften Tiere beweglich und es erleichtert sich ihnen dadurch Nahrungserwerb und Atmung. — Auch den langsamen Aktinien erwächst ein solcher Vorteil, wenn sie sich schnelleren Tieren anheften. Antholoba reticulata lebt fast ausschließlich mit anderen leichter beweglichen Tieren zusammen und bevorzugt an der chilenischen Küste die Krabbe Hepatus chilensis. Nach Bürger waren unter 60 beobachteten Hepatus nur vier ohne Aktinie. Bei der Herbeiführung der Symbiose ist die Aktinie der aktive Teil. Losgelöst sucht sie mit nach oben gekehrter Fußscheibe das Bein einer Krabbe zu umfassen und erklettert von dort den Rücken. Der Aktinie fällt wohl auch der Hauptnutzen zu, indem ihr die Jagd auf Beute erleichtert wird. — Im Gegensatz zu vorigem ist es bei der Symbiose zwischen den Einsiedlerkrebsen (Pagurus), welche leere Schneckengehäuse bewohnen, und einer Reihe von Aktiniengattungen (Sagartia, Adamsia, Epizoanthus u. a.), der Krebs, welcher die Initiative ergreift; ist er infolge Wachstums gezwungen, eine größere Wohnung zu suchen und zu beziehen, so ergreift er die Genossin und versetzt sie auf das neue Haus, ohne daß dieselbe von ihren Akontien Gebrauch macht. Der Krebs besitzt an der Aktinie

eine Verteidigerin, welche ihrerseits durch erleichterte Ortsveränderung und Teilnahme an der Beute des Krebses entschädigt wird. — Aehnlich liegen die Verhältnisse bei Pagurus Prideauxi, dessen Symbiont, der koloniebildende Polyp Podocoryne carnea, rings um die Oeffnung der Krebswohnung langgestreckte Wehrpolypen entwickelt, welche sich gegen jeden nahenden Feind richten. — Den Einsiedlerkrebsen, die mit Schwämmen oder mit koloniebildenden Polypen vergesellschaftet sind, erwächst vielfach noch der Vorteil, daß sie den Umzug in eine größere Wohnung, der ihnen wegen des weichhäutigen Abdomens gefahrbringend ist, ganz vermeiden können. Die obengenannte Podocoryne, Hydractinia u. dgl. scheiden nämlich eine Kalkkruste ab, welche die Mündung des Schneckenhauses überragt und damit die Wohnung vergrößert. In einigen genannten Fällen liegt eine strenge Gesetzmäßigkeit insofern nicht vor, als manche der betreffenden Tiere auch ohne Gesellschafter gefunden wurden.

Ihrer inneren Natur nach unbekannt sind noch die sogenannten Symbiosen von Steinkorallen (Madrepora, Lophohelia, Stenohelia usw.) mit Würmern (Polynoinen, Euniciden) und anderen Tieren; häufig dürfte es sich um Raumparasitismus oder Synökie ohne engere Beziehung handeln.

Dagegen scheinen die Verbindungen zwischen einigen kleinen Fischarten und großen Aktinien engere, gegenseitige zu sein. Die 5 und 8 cm langen, zierlichen Trachichthys tunicatus und Clarki z. B. leben nur in unmittelbarster Nähe zweier Aktinienarten. Ersterer hält sich regelmäßig auf der Mundscheibe zwischen den Tentakeln auf, da er nach Sluiter sogleich seinen zahlreichen Feinden zur Beute wird, wenn er diesen Schutz verläßt[1]; letzterer entfernt sich nur kurze Strecken, um bei Gefahr sogleich in die Aktinie zu flüchten. Der Nutzen liegt hauptsächlich auf seiten der Fische: sie erhalten Schutz und nehmen an der Aktinienbeute teil; ihre Gegendienste bestehen darin, daß sie durch ihre lebhaften Bewegungen ständigen Wasserwechsel verursachen, die Mundscheibe von Verunreinigung freihalten und eventuell sogar Nahrung herbeischaffen, die der Aktinie unerreichbar ist.

Eine Art Gegenseitigkeitsverhältnis, das wir aber nicht eigentlich als Symbiose bezeichnen können, hat sich zwischen einigen Vogelarten und Wiederkäuern, bezw. Huftieren entwickelt. In unserem Faunengebiet sind es hauptsächlich Stare und Schafstelzen, die das Weidevieh begleiten und ihm durch Wegfangen von Ungeziefer dienlich sind; beide empfinden keine Scheu voreinander; ungestört können die Vögel den Vierfüßlern Fliegen und Maden von der Haut ablesen. In höherem Maße geschieht das in den Tropen seitens der Madenfresser (Crotophaga), Madenhacker (Buphaga) und Kuhreiher (Bubulcus), beim Elefanten, Nashorn, Büffel, Kamel u. a., welche selbst widerstandslos das Aufhacken der Dasselbeulen und Auspicken der Zecken an ihrem Körper ertragen. — Ein behender Regenpfeifer (Pluvianus aegyptius) lebt in gewisser näherer Geselligkeit mit dem Nilkrokodil, dem er Blutegel und Schmarotzer abliest, auch solche, die an den Kinnladen oder am Zahnfleisch sich befinden; sein lautklingender Warnruf bei nahender Gefahr mag andererseits dem schlafenden Saurier Nutzen bringen (Krokodilwächter). Diese Geselligkeit dürfte lediglich auf der Gewandtheit des Vogels basieren.

3b) Bei sozialen Tieren. *α*) Trophobiose bei Ameisen. Bei zahlreichen Ameisenarten finden wir zunächst eine Art von enger Symbiose, welche treffend „Trophobiose" genannt wurde. Es ist damit das Verhältnis gekennzeichnet, in dem jene zu den Larven von Cikaden, Lycaeniden (Bläulingen), sowie vornehmlich zu den Cocciden und den Blatt- und Wurzelläusen stehen. Alle diese Insekten werden von verschiedenen Ameisen entweder nur besucht oder innerhalb wie außerhalb der Nester gezüchtet und gepflegt. Die unterirdisch lebenden Acanthomyops, Lasius und andere Formen sind ganz oder fast ausschließlich auf die Wurzellausnahrung angewiesen. Während die Läuse auf Fühlerstreicheln der Ameisen hin ihre zuckerhaltigen Exkremente austreten lassen, besitzen die Lycaenidenraupen am 11. Körpersegment spezielle Honigdrüsen, die Fulgoriden Thorax- und Abdominaldrüsen, deren Saft von den Ameisen begehrt ist. — Allen Trophobionten erwächst aus diesem Verkehr ein sicherer Schutz gegen mannigfache Feinde, besonders aus dem Insektenreich. Vielfach werden von den Ameisen sogar Bauten aus Erde, Karton oder Gespinst über ihnen errichtet, welche auch gegen Temperatureinflüsse Schutz gewähren (u. a. von Cremastogaster lineolata und pilosa, Nordamerika). Bei den Blatt- und Wurzelläusen beschränkt sich die Sorge der Ameisen oft nicht auf die Erwachsenen, sondern es werden im Herbst deren Eier gesammelt und im Nest überwintert. Webster (1907) beschreibt die

[1]) Trachichthys, ohne Aktinien in ein Aquarium gesetzt, wurden unmittelbar von größeren Fischen verzehrt; mit Aktinien hielten sie sich über 6 Monate; — Wenn die Aktinie aus dem Wasser gehoben wird, geben sich die Fische mit gefangen. Tr. Clarki fing herabsinkende Fleischstücke auf, brachte sie zur Aktinie und drückte sie mit Schwanzschlägen gegen Mundscheibe und Tentakel; er selbst zupfte sich kleine Bissen ab.

Pflege des Wurzelschädlings Aphis maidiradicis durch Lasius americanus. Im Frühjahr werden die jungen Läuse bei gutem Wetter an die Futterstellen transportiert, bei schlechtem Wetter oder in kühlen Nächten werden sie wieder ins Ameisennest in Sicherheit gebracht; ebenso werden sie von älteren Wurzeln weggenommen und wieder an jüngere übertragen. — Daß die Aphiden ihren Schutzherren andererseits angepaßt sind, ist daraus zu ersehen, daß sie ihnen niemals auszuweichen oder zu entweichen streben, und daß sie ihre Exkremente auf die Aufforderung der Ameisen hin langsam und reichlicher austreten lassen, während sie dieselben bei jeder anderen Berührung schnell und weit von sich spritzen. Nie machen sie gegen die Ameisen von ihren Wehrsiphonen Gebrauch. — Als Blattlauszüchter kommen in erster Linie in Betracht Angehörige der Ameisengattungen: Tetramorium, Iridomyrmex, Dolichoderus, Liometopum, Lasius, Brachymyrmex, Plagiolepis, Formica, Acanthomyops und viele andere. Von Wurzelläusen wird Paracletus cimiciformis, Forda u. a. ausschließlich in Ameisennestern gefunden. Bei manchen Ameisen kommen zahlreiche Aphidenarten als Pfleglinge vor; bei unserem Lasius niger nach Schouteden nicht weniger wie 17, die sich auf 9 Genera verteilen.

β) Synökie und Symphilie bei Ameisen und Termiten. Die großen, wehrhaft verteidigten, oft mit reichen Vorräten versehenen Bauten dieser sozialen Tiere sind natürlich besonders geeignet anderen Formen geschützten Unterschlupf und Nahrung zu bieten, besonders solchen, welche von deren Eigentümern und Erbauern aus irgendeinem Grunde keine Feindseligkeiten zu gewärtigen haben. Das Heer der „gesetzmäßigen Mitbewohner“ in Ameisen- und Termitenbauten — hauptsächlich dem Insektenreich zugehörig — der sogenannten Myrmecophilen und Termitophilen, umfaßt nach Wasmanns Einteilung vier biologische Kategorien: Parasiten, Synechthren (feindliche Einmieter), Synöken oder Metöken (indifferent geduldete Einmieter) und Symphilen (echte Gäste). Für die Symbiose kommen nur die letztgenannten beiden Gruppen in Betracht und hierbei die der Synöken nur in geringem Maße. Unter ihnen scheiden nämlich alle jene aus, welche von den Ameisen wegen ihrer Kleinheit nicht beachtet werden. Dagegen ziehen die größeren Synöken, welche meist auf Grund einer erworbenen Schutz- und Trutzgestalt oder Behendigkeit von den Ameisen und Termiten gleichgültig geduldet sind, nicht nur Nutzen aus ihren Wirten, sondern sind selbst häufig auch diesen von Vorteil. — So machen unsere heimischen Dinarda bei den verschiedenen Formicaarten eifrig Jagd auf die häufig vorkommenden parasitischen Milben und sind unter Umständen wohl imstande, eine beginnende Milbenplage zu unterdrücken; sie und viele andere Synöken machen sich ferner durch Vertilgung von Abfällen und Leichen nützlich, vergreifen sich allerdings wohl auch an kranken Ameisen oder an der Brut. Immerhin sehen wir hier die Grundlagen zu einer engeren Verknüpfung, zu einer Symbiose gegeben, wie wir sie bei den meisten Symphilen finden, und von der Synökie führen viele Brücken zu diesen hinüber.

Mit dem „echten Gastverhältnis“ sind mehrere Anpassungscharaktere der Symphilen eng verknüpft. Bei den Ameisengästen bestehen dieselben vorzüglich in Exsudatorganen in Gestalt von goldgelben oder rötlichen Büscheln oder Pinseln (Trichomen), oder von Gruben und Poren, sowie in einer weitgehenden Umbildung der Mundteile, insbesondere der Unterlippe und ihrer Taster. Die Färbung der echten Gäste ist meist eine gelbrötliche bis braune, fettglänzende. — Bei den Termitengästen treten Trichome etwas seltener auf, statt dessen sind sie durch eine hochgradige Aufschwellung des Abdomens (Physogastrie) ausgezeichnet. Exsudatporen und -knospen sind reichlich vorhanden, ebenso Umbildungen der Mundteile. Ameisen-



Fig. 5.

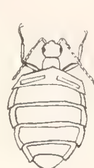


Fig. 6.

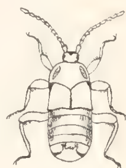


Fig. 7.

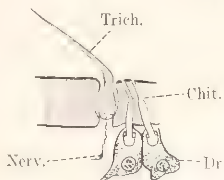


Fig. 8.

Fig. 5. ~~bis 8.~~ Paussus Jerdani. Trichome und Exudatgruben des Kopfes, der Fühler und des Thorax. 6. Termitobia physogastra. 7. Lomechusa amurensis. Trichome der Segmentränder. Nach Westwood und Wasmann. 8. Myrmekophilen-Drüse von Claviger. Nach Krüger.

und Termitengäste zeigen ferner zahlreiche Anpassungen an den Fühlern und Beinen. Teils findet das darin seine Erklärung, daß sie im Gegensatz zu den Synöken mit ihren Wirten oft in freundschaftlichen Fühlerverkehr treten (Lomechusa u. a.), teils dienen die Fühler als Haupttransportorgane (Paussus, Claviger) oder dazu noch als Exsudatorgane (Paussus). — Als echte Ameisengäste sind an erster Stelle zu nennen: alle Clavigeriden, zahlreiche Paussiden, einige Thorictiden, mehrere Staphylinidengruppen wie Lomechusa, Sympolemon u. dgl. Die Nitidulide Amphotis marginata und die Histeridengattung Hetaerius, sowie manche Paussiden stellen einen Uebergang von Synökie zur Symphilie dar; unter den Paussiden treffen wir endlich auch Arten, welche als Synechthren bezeichnet werden müssen. Als echte Termitengäste seien genannt: die Scarabaeiden Corythoderus und Chaetopistes; Napochustermitophilus, Termitobia, Termitominus, Corotoca, Spirachtha, alle Rhyssopaussiden u. a. — Alle Synöken und Symphilen sind streng gesetzmäßig an bestimmte, meist nur an eine Wirtsart gebunden und kommen selbständig ohne diese nicht vor. Sie suchen deren Bauten auf, falls sie nicht dort ihre ganze Entwickelung durchmachten, oder sie werden aufgesucht und in das Nest gebracht. — Der Nutzen des Zusammenlebens liegt vorwiegend auf seiten der Gäste. Sie werden gefüttert (manche haben die selbständige Nahrungsaufnahme fast verlernt), gepflegt, transportiert und bei Gefahr in Sicherheit gebracht (Claviger- und Paussusfühler; Claviger ist blind), vielfach sogar ganz aufgezogen wie Ameisenbrut (Lomechusagruppe). Dagegen liefern sie den Termiten und Ameisen reichliche Sekrete und flüchtige Exsudate, welche von diesen mit Gier gesucht und aufgenommen werden, aber anscheinend weniger als Nahrungsmittel wie als Genußmittel dienen. Sie schaden andererseits mitunter dadurch, daß sie gelegentlich Wirtsbrut verzehren, oder derselben die für sie bestimmte Nahrung entziehen. — Oft ist also die Symphilie eine eigenartige Mischung von Symbiose und Parasitismus, oder ein Parasitismus unter dem Deckmantel der Symbiose. — Ob nicht bei den Termitengästen vielfach eine reine Symbiose zustande kommt, läßt sich zurzeit nicht beurteilen.

γ) Sklaverei bei Ameisen. In den gemischten Kolonien sogenannter sklavenhaltender Ameisen kommt eine auf Arbeitsteilung beruhende Symbiose zustande (Dulosis). Der Ausdruck Sklaverei gibt ein falsches Bild, da die zusammenhausenden Arten gleichberechtigt sind. Verschiedene Arten, eine kriegerische und eine oder selten zwei schwächere bilden einen Staatenverband mit gemeinsamem Haushalt. Die Initiative geht von der kriegerischen Art aus, welche ein Nest der schwächeren Art überfällt und dort Puppen raubt. Die Sklavenart verrichtet alle häuslichen Geschäfte, Aufzucht der Larven, Bautätigkeit, Fütterung der Herren. Die Herrenart verteidigt vornehmlich den Bau und geht auf Kriegs- und Beutezüge aus. Die Amazonenameisen (Polyergus) sind durch Umbildung der Kiefer untauglich zu Hausarbeit und zu selbständiger Nahrungsaufnahme geworden; sie sind ganz

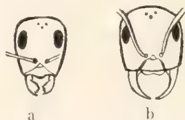


Fig. 9. a Kopf von Formica fusca mit bandförmigen, b von Polyergus mit sichelförmigen Mandibeln.

auf die Pflege seitens der Sklaven angewiesen (obligatorische Sklavenhalter); die Raubameisen (Formicasanguinea-Gruppe) können, wenn auch höchst selten, sklavenlose Staaten besitzen (fakultative Sklavenhalter). — Beispiele: F. sanguinea mit F. fusca oder rufibarbis, oder mit beiden; F. rubicunda mit F. subsericea, neorufibarbis, fuscata; F. subintegra mit F. subsericea oder subpolita. Polyergus rufescens mit F. fusca, rufibarbis oder mit beiden als Sklaven; P. breviceps mit F. argentata oder subsericea; P. bicolor mit F. subaenescens.

Literatur. **C. W. S. Aurivillius**, *Die Maskierung der oxyrhynchen Krabben durch besondere Anpassungen ihres Körperbaues. Kgl. Sv. Vet. Ak., Bd. 23. Stockholm 1889.* — **K. Brandt**, *Ueber die morphologische und physiologische Bedeutung des Chlorophylls bei Tieren. I. Arch. f. Anat. u. Phys., 1882; II. Mitt. Zool. St. Neapel, 1883.* — **Buchner**, *Studien an intrazellularen Symbionten. Arch. Prot., XXVI, 1912.* — **Bürger**, *Zusammenleben von Antholoba und Hepatus. Biol. Centralbl., XXIII, 1903.* — **Doflein**, *Lehrbuch der Protozoenkunde. Jena 1909.* — **O. Hertwig**, *Die Symbiose im Tierreich. Jena 1883.* — **von Ihering**, *Die Cecropien und ihre Schutzameisen. Engl. Bot. Jahrb., Bd. 39, 1907.* — **Fr. Keeble**, *The Yellow-brown cells of Convoluta paradoxa. Quart. Journ. Micr. Sc., LII, 1908.* — **Kraepelin**, *Beziehung der Tiere zueinander und zur Pflanzenwelt. Natur- u. Geistesw. Leipzig 1905.* — **A. Mordwilko**, *Die Ameisen und Blattläuse in ihren gegenseitigen Beziehungen. Biol. Centralbl., XXVII.* — **A. Pütter**, *Stoffwechsel der Aktinien Z. f. allgem. Phys., XII, 1911.* — **Schimper**, *Wechselbeziehungen zwischen Pflanzen und Ameisen. Jena 1888.* — **C. Ph. Sluiter**, *Ein merkwürdiger Fall von Mutualismus. Zool. Anz., XI, 1888.* —. **E. Wasmann**, *Zur näheren Kenntnis des echten Gastverhältnisses. Biol. Centralbl., XXIII.* — **M. Weber et Mme A. Weber**, *Quelques cas nouv. d. Symbiose. Zool.*

Erg. einer Reise in Niederl. O.-Ind., I. Leiden 1890. — ***W. M. Wheeler***, *Ants. New York 1910.*

A. Reichensperger.

b) Flechten.

1. Definition. 2. Die Komponenten. 3. Vegetationsorgane. 4. Fortpflanzungsorgane. 5. Die Synthese der Flechten. 6. Lebenserscheinungen. 7. Geographische Verbreitung.

1. Definition. Die Flechten sind das Produkt der Lebensgemeinschaft von Pilzen und Algen. Die Komponenten treten in diesem weitaus häufigsten Fall von Symbiose in so enge Beziehungen und beeinflussen sich gegenseitig so stark, daß ganz neuartige Doppelorganismen entstanden sind.

2. Die Komponenten. Die Flechtenpilze sind fast ausschließlich Askomyceten; man kennt nur ein paar tropische Flechten, bei denen ein Basidiomycet in die Symbiose eintritt. Da die Doppelorganismen als solche eine phylogenetische Entwickelung durchgemacht haben, so läßt sich heute bei den meisten unmöglich sagen, von welchen Familien der Askomyceten sie im einzelnen herstammen, nur bei einigen wenig entwickelten krustenförmigen Flechtenfamilien kann man erkennen, daß der Pilzteil den Patellariaceae, den Hysteriaceae oder den Xylariaceae angehört. Besser kann man den Algenanteil auf die entsprechenden freilebenden Familien zurückführen. Die Mehrzahl der Flechten, darunter alle höheren Formen, enthält einzellige grüne Algen aus der Familie der Protococcaceae. Geringer ist die Zahl derjenigen Pilze, die sich mit den verzweigten Zellfäden der Chroolepidaceae — gleichfalls Grünalgen — vereinigt haben. Es gibt auch viele Flechten, in denen sich Cyanophyceen, also Spaltalgen mit blaugrünem Inhalt, finden. Von diesen spielen aber nur die rosenkranzförmigen Zellreihen der Nostocaceae eine größere Rolle.

3. Vegetationsorgane. 3a) Wuchs. Die Lichenologie hat die Flechten Jahrhundertelang als selbständige Pflanzengruppe behandelt und tut das teilweise noch, obwohl seit nunmehr 50 Jahren die komplexe Natur derselben erkannt ist. Wir wollen zunächst den alten Lichenologen folgen und unterscheiden mit ihnen 1. Krusten-, 2. Blatt-, 3. Strauchflechten. Alle diese Formen stellen eine Anpassung des Flechtenkörpers an das Lichtleben dar. In der mannigfaltigsten Weise ist dafür gesorgt, daß die im Thallus enthaltenen Algen, welche stets nahe an der Oberfläche liegen, ihre assimilatorische Tätigkeit in ausgiebigem Maße vollziehen können.

1. Der krustenförmige Thallus sitzt entweder der Unterlage auf oder ist darin eingesenkt. Das letztere kann so weit gehen, daß nur noch die Fruchtkörper an die Oberfläche kommen. Nach dem Verhalten des Thallus zu seinem Substrat unterscheidet man epi- und hypophloëodische Formen. Die ersteren wachsen auf, die letzteren in der Rinde von Bäumen. Außerdem spricht man von epi- und endolithischen Krustenflechten, je nachdem sie auf oder im Gestein vegetieren.

Die im Substrat lebenden Flechten zeigen morphologisch und physiologisch noch manche Aehnlichkeiten mit ihren an das Nährsubstrat gefesselten Pilzahnen und demgemäß ist vielfach ein spezifischer anatomischer Bau noch nicht ausgeprägt.

2. In der weiteren Ausgestaltung der Flechten tritt nun aber die Tendenz hervor, sich von der Unterlage loszulösen und damit ihre Algen in eine noch günstigere Lichtlage zu bringen. Dieses wird auf zwei Wegen erreicht; die zur Entwickelung der Blatt- oder Laubflechten einerseits und der Strauchflechten andererseits geführt haben. Die Blattflechten bilden (Fig. 1) einen kreisförmigen Thallus, der aus lauter gewellten aufstrebenden Lappen besteht. Der Thallus der Blattflechten ist dorsiventral gebaut, die Oberseite ist mehr oder minder glatt, sie beherbergt die Algen (vgl. S. 932). Die fast farblose Unterseite ist mit Rhizinen versehen, welche bei manchen Arten pinselartig beisammen stehen oder gar zu nabelartig dicken Bündeln vereinigt werden, welche auf das Zentrum des Thallus beschränkt zu sein pflegen. Alle diese Organe dienen natürlich der Festheftung und der Wasseraufnahme.



Fig. 1. Parmelia Acetabulum. Nach Reinke.

3. Die Strauchflechten sind durch alle Uebergänge mit den vorgenannten verbunden. Durch Vergrößerung und Aufrichtung der Lappen entstehen hirschgeweihähnliche Körper, z. B. bei Evernia und

anderen (Fig. 2). Diese sind noch dorsiventral gebaut. Bei Parmelien und Cetrarien finden sich häufig senkrechte, radiär ausgebildete Thalluslappen; endlich voll-



Fig. 2. Evernia furfuracea. Nach Reinke. a Apothecien.



Fig. 3. Cladonia alcicornis. ⁴/₁. Nach Reinke. a Apothecien.

kommen radiär in ihrer äußeren Form wie auch in ihrem inneren Bau sind die höchst entwickelten Strauchformen wie die Bartflechte Usnea barbata. Alle Strauchflechten sind nur mit einer relativ kleinen Haftscheide an dem Substrat befestigt (Fig. 2).

Eine besondere Stellung nehmen die Cladonien und deren Verwandte ein; die niedersten Arten der Gattung bilden blattflechtenähnliche Körper; von ihnen erheben sich kurze Stiele oder Becher (Fig. 3), die den Namen Podetien (Lagerstiele) führen und an ihrem Rande die Fortpflanzungsorgane (Apothecien) tragen. Bei den höherstehenden Vertretern der Gattung Cladonia, z. B. bei Cladonia rangiferina (der bekannten Renntierflechte Fig. 3a) sind die Podetien reich verzweigt, fast alle Zweigspitzen tragen die kleinen dunkelbraunen, fast schwarzen Fortpflanzungsorgane.

3b) Bau. Den oben herausgehobenen Typen lassen sich die einfachsten Flechten nicht wohl unterordnen und doch sind sie von wesentlichem Interesse, weil sie den



Fig. 3a. Cladonia rangiferina. Nach Reinke.

Weg zeigen, den Algen und Pilze einschlugen, um in gemeinsamer Arbeit die komplizierteren Formen aufzubauen. Die Reihe beginnt offensichtlich mit den fakultativen Lichenen oder Halbflechten, Pilzen, die gewöhnlich saprophytisch, gelegentlich aber mit Algen zusammen leben.

Genauer untersucht ist von diesen durch Frank Arthonia vulgaris, eine auf und in der Rinde von Laubbäumen lebende Flechte, deren Pilzhyphen längere Zeit algenfrei in den äußeren Rindenschichten wuchern. Zur Fruktifikation schreiten sie aber erst, wenn sie auf die Zellen von Chroolepus umbrinus getroffen sind, einer im gleichen Substrat lebenden Alge. Die Algenzellen werden dabei in Farbe und Gestalt erheblich verändert (s. a. unten).

Hieran schließt sich auch Coenogonium (Fig. 4). Der Pilz umspinnt gelegentlich die Fäden einer Trentepolia. Den Eindruck der zufälligen Vereinigung macht auch noch der Thallus mancher wenig entwickelten Flechtenfamilien wie der Calicieen, Graphideen usw. und ähnliches gilt für die in Figur 5 abgebildete Gattung Thelidium.

Das führt hinüber zu dem sogenannten homoiomeren Flechtenthallus, in welchem

Algen und Pilze zwar eng verkettet sind, sich aber doch ziemlich regellos durchdringen:

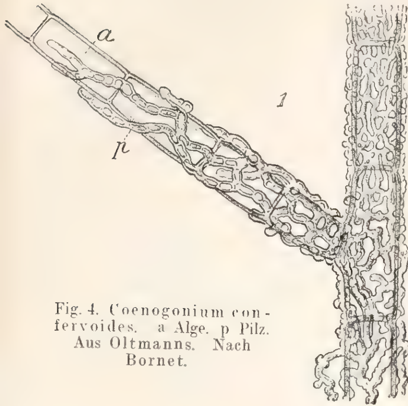


Fig. 4. Coenogonium confervoides. a Alge. p Pilz. Aus Oltmanns. Nach Bornet.

Collemaceen. Auf einem Schnitt durch eine solche Flechte (Fig. 6) findet man gewöhnlich die Algen (im abgebildeten Fall die Gattung Nostoc) und auch die Hyphen an der Oberfläche etwas näher zusammengedrängt. Der übrige Thallus ist gleichmäßig von dem mit einer dicken durchsichtigen Gallertscheide

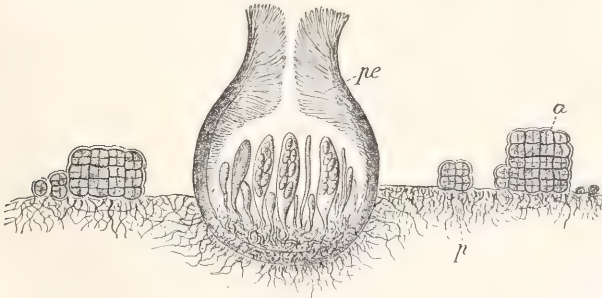


Fig. 5. Thelidium minutulum. a Alge. p Pilz. pe Perithecium. Aus Oltmanns. Nach Stahl.

umgebenden Nostocschnüren und den zarten Pilzhyphen erfüllt. Unten (in Fig. 6 nicht mehr mit abgebildet) treten die Elemente ähnlich wie an der Oberfläche dichter zusammen.

Erst bei den höheren Formen ist dann der-

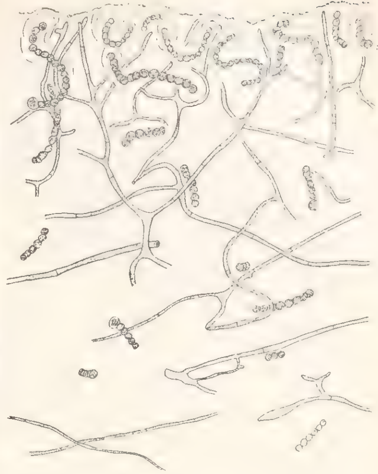


Fig. 6. Schnitt durch den oberen Teil von Collema spec. Original.

jenige Typus erreicht, den wir als den heteromeren, man kann wohl sagen den typischen Flechtenthallus kennen. An einem Schnitt durch ihn (Fig. 7) liegen von oben nach unten folgende Schichten. Eine Oberrinde (or), die aus eng verflochtenen und durch eine Zwischensubstanz verkitteten Hyphen besteht. Darunter liegt eine Algenschicht (a), an die sich das lockere Markgewebe (m) anschließt. Unten wird der Thallus wieder durch eine Rindenschicht

begrenzt, die häufig durch Rhizoiden an der Unterlage befestigt ist. Die Rinde ist nicht selten von Poren unterbrochen, die sich bei den Stictaceen und Parmeliaceen zu besonderen Organen, den Cyphellen entwickeln. Diesen Bau findet man mit größeren

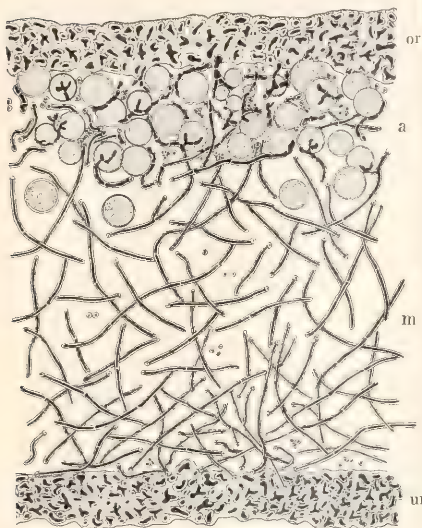


Fig. 7. Schnitt durch den Thallus von Parmelia Acetabulum. Original.

oder geringeren Modifikationen bei den meisten dorsiventralen Flechten wieder. Die lichtwärts gekehrten Algen, die Durchlüftungsräume zwischen den Hyphen gewährleisten Photosynthese und Gasaustausch.

Die radiären Strauchflechten werden den gleichen Anforderungen gerecht, indem sie Oberrinde und Algenschicht mantelartig an die Peripherie der gerundeten Triebe verlagern, während die lockeren Hyphenmassen die Mitte einnehmen.

Die Ausbildung der reich verzweigten Sprosse resp. Podetien stellt nun aber ganz besondere Anforderungen an ihre mechanische Leistungsfähigkeit. Die aufrechten Lagerstiele müssen biegungsfest gebaut sein, was meistens durch hohlzylindrische Gestalt des Thallus erreicht wird (Cladonia). Diejenigen Strauchflechten, die nicht radiär gebaut sind, erreichen eine biegungsfeste Konstruktion durch starke Hyphenstränge, die sich von innen pfeilerartig an die Rinde legen (Ramalina). Die (hängende) Bartflechte ist zugfest gebaut, in der Mitte ihres radiären Thallus verläuft ein dicker Hyphenstrang, der ziemlieh bedeutende Gewichte tragen kann. Die Laubflechten werden im allgemeinen wenig mechanisch beansprucht, nur die ganz großlappigen Formen müssen vor dem Einknicken oder Zusammenrollen geschützt werden. In dieser Beziehung bemerkenswert sind die Thalli von Umbilicaria und von Sticta, deren große Flächen durch Ausbildung von vielen Falten und Pusteln — dem Prinzip des Wellblechdaches entsprechend — eine gewisse Steifigkeit bekommen.

Das Wachstum des heteromeren Thallus wird vollständig von den Pilzhyphen beherrscht, es ist hauptsächlich interkalar. Das Spitzenwachstum spielt nur bei denjenigen Flechten eine größere Rolle, die ihrer ganzen Ausdehnung nach der Unterlage fast angeschmiegt sind, so daß sie ihren Körper nicht durch eingeschobene Elemente vergrößern können. Der wachsende Rand dieser Flechten ist gewöhnlich noch frei von Algen, die wahrscheinlich von innen nachgeschoben werden, und umgibt als weißer (Pertusaria) oder schwarzer (Lecidea) Saum die Flechte. Das ist das Vorlager oder Prothallus, das morphologisch dem aus der keimenden Spore entstandenen Hyphengewebe entspricht. Dies letztere wird, so lange es noch nicht mit Algen in Beziehung getreten ist, Protothallus genannt. Im Anschluß daran mag noch erwähnt sein, daß diejenigen algenlosen Thallusteile, die in das Substrat eindringen, als Hypothallus bezeichnet werden. Auch das Dickenwachstum erfolgt interkalar, wobei sich in die Rindenschicht neue Elemente einschieben, während die alten außen sterben und allmählich abgestoßen werden.

Beim homoiomeren Thallus wird das Wachstum im allgemeinen von der Alge bestimmt. Besonders auffällig ist das bei Ephebe pubescens, wo die blaugrüne Fadenalge Sirosiphon den Hyphen immer schon etwas voraus ist, so daß ihre Scheitel und manchmal ganze Aeste vom Pilze völlig frei sind (vgl. auch Fig. 5).

Sehr instruktiv für diese Verhältnisse ist auch die Basidiolichene Dictyonema, von der wir unten berichten.

4. Fortpflanzungsorgane. Wir wenden uns jetzt zu den Fortpflanzungsorganen und betrachten zunächst die Schlauchfrüchte. Diese haben die Flechten von den Askomyceten übernommen und vielfach überhaupt nicht weiter gebildet, so daß in nicht wenigen Flechtengruppen reine Disco- oder Pyrenomycetenfrüchte zum Vorschein kommen, wie eine solche z. B. in Figur 5 wiedergegeben ist (vgl. auch den Artikel „Pilze“). Die meisten Blatt-, wie auch viele Strauch- und Krusten-

flechten haben aber eine Fruchtform erworben, welche sich (Fig. 8) durch die Anwesenheit von Algen in der Wandung auszeichnet. Diese Apothecien mit Thallusrand zeigen auf einem Schnitte, der senkrecht zur Fruchtscheibe geführt ist, von innen nach außen folgende Teile (vgl. Fig. 8) die Schlauchschicht oder Thecium (t); diese besteht aus keulenförmigen Sporenschläuchen, den Asci (s), die in der Regel acht ziemlich große, manchmal aber auch viele kleine, oder auch ein bis zwei ganz große Sporen (sp) enthalten. Zwischen den Schläuchen befinden sich die viel schmäleren Paraphysen (p) oder Füllfäden, die einfach oder verzweigt sein können und manchmal zu einer strukturlosen gallertigen Masse verschwimmen. Sie sind länger als die Schläuche und bilden oberhalb die außen sichtbare Scheibe oder das Epithecium (e), dessen oft lebhafte Färbung durch die Paraphysenspitzen hervorgerufen wird. Unter der Schlauchschicht befindet sich der Fruchtboden oder das Hypothecium (h). Diesem entspringen sowohl die Füllfäden als auch die Schläuche. Das Hypothecium schließt die Schlauchschicht schüsselförmig ein, tritt am Rande nach außen hervor und bildet dadurch das eigene Gehäuse der Frucht, das Parathecium (pt), das aber nur bei dunkler Färbung auffällig ist. Die bisher genannten Schichten sind alle ein Erbteil des Pilzes, sie werden eingeschlossen durch eine Neuerwerbung der Flechte, das Lagergehäuse oder Amphithecium (at). Es ist gewöhnlich wie der Thallus der betreffenden Flechte gebaut; man findet also von außen nach innen Rinde (r), Algenschicht (a) und Mark (m), das sich entweder direkt an das Hypothecium anschließt, oder unter Einschaltung einer zweiten Algenschicht.

Natürlich ist dieses thallinische Apothecium sehr variationsfähig, besonders tritt die Tendenz hervor, seine assimilatorischen Fähigkeiten durch Streckung des Lagergehäuses zu steigern. Die höchste Stufe hat diese Entwickelung in den oben erwähnten Podetien der Cladonien gefunden (vgl. Fig. 3a). Diese sind zwar insofern den Apothecien nicht homolog, als das fruktifikative Gewebe nicht unten im horizontalen Thallus, sondern erst oben in den Podetiumzweigen angelegt wird, aber man wird doch nicht fehlgehen, wenn man annimmt, daß die Podetien sich phylogenetisch aus gestreckten Amphithecien entwickelt haben. Die Basidio-Lichenen haben genau die Fortpflanzungsorgane der Basidiomyceten (vgl. diese).

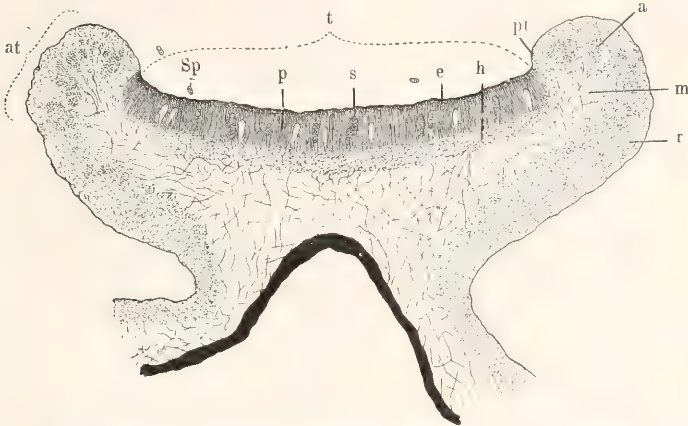


Fig. 8. Schnitt durch das Apothecium von Physcia pulverulenta. Original.

Genauer müssen wir nun auf die Entwickelung der Frucht eingehen, weil die Flechten hier eine Reihe von eigenartigen Zügen aufweisen. Man nimmt heute wohl allgemein an, daß ursprünglich alle Askomycetenfrüchte auf sexuellem Wege entstanden sind. Während aber heute die reinen Pilzformen — soweit sie überhaupt noch sexuell sind — mit wenigen Ausnahmen Sexualorgane aufweisen, die sich aneinanderlegen und so eine Kernvereinigung ermöglichen, haben viele Flechtenpilze anscheinend

eine ältere Befruchtungsart konserviert, nämlich die einer weiblichen Hyphe durch freie, einzellige Spermatien. Das weibliche Organ heißt das Carpogon (Fig. 9a und b);



Fig. 9. Trichogyne von Collema crispum. Nach Baur.

es besteht aus einer vielzelligen Hyphe, deren unterer, in das Thallusgewebe eingeschlossener Teil schraubig oder unregelmäßig knäuelig gewunden ist und den Namen Askogon führt, während der obere, die Trichogyne, gerade verläuft und mit der letzten Zelle über die Oberfläche hinausragt. Aus dem Askogon entstehen die askogenen Hyphen, die sich in dem Hypothecium der jungen Frucht ausbreiten und später die Asci bilden. Die Trichogyne hat ihren Namen teils von der haarförmigen Gestalt, teils von der ihr zugeschriebenen Funktion. Die nach außen vorragende Zelle soll nämlich die im Regenwasser auf der Thallusoberfläche herumschwimmenden kleinen Spermatien auffangen. Man stellt sich vor, daß dann eine Verbindung zwischen Trichogynspitze und Spermatium eintritt, durch die der männliche Kern in das Carpogon einwandert. Das Ankleben von Spermatien an der Trichogynspitze hat man oft gesehen, auch die offene Verbindung zwischen Spermatium und Trichogyne ist in einigen Fällen beobachtet worden (Fig. 9a), aber von dem eigentlichen Befruchtungsvorgang wissen wir nur, daß in den Trichogynzellen Verquellungen der Wände zu sehen sind, und daß sie abstirbt, bevor die askogenen Hyphen entstehen. Von den Kernverhältnissen ist nichts bekannt (Stahl, Baur). Unter diesen Umständen ist es sehr verständlich, wenn viele Forscher an der sexuellen Funktionsfähigkeit der Trichogyne zweifeln, zumal es Möller auch gelungen ist, die Spermatien zum Keimen und zur Entwickelung eines kleinen Thallus zu bringen. Deshalb werden diese von vielen gar nicht für Befruchtungsorgane, sondern für ungeschlechtliche Sporen oder Conidien gehalten. Da es aber bei manchen Flechten Spermatien und echte Conidien gibt, so ist doch wenigstens wohl anzunehmen, daß die Spermatien ursprünglich sexuell waren und eventuell einen Funktionswechsel durchgemacht haben. Die Trichogyne wären dann funktionslos gewordene Organe. Daß die Dinge im Begriff sind, sich in dieser Richtung zu entwickeln, das zeigt jedenfalls die Tatsache, daß es eine Reihe Flechtengattungen gibt, bei denen keine Trichogyne mehr vorkommen. Andererseits sind in allerjüngster Zeit an einer amerikanischen Collema von Bachmann Trichogyne beobachtet, die direkt auf die bei dieser Form nicht losgelösten Spermatien zuwachsen und sich mit ihnen vereinigen. Es ist bei dieser Flechte auch ein Einwandern des Spermatiumkernes in die Trichogyne festgestellt. Dagegen sind die Kernverhältnisse im Askogon so kompliziert, daß noch nicht sicher festgestellt werden konnte, welche Rolle der Spermatiumkern bei der Entwickelung der askogenen Hyphen spielt. Die Probleme, um die es sich hier handelt, sind eingehender dargestellt in den Artikeln „Fortpflanzung der Gewächse“ 1b („Pilze“) und „Pilze“. Wegen des merkwürdigen Verhaltens der Spermatien bei der neuen Collema kann man diese Beobachtungen nicht ohne weiteres auf Flechten mit freien Spermatien übertragen, aber trotz dieser Einschränkung sprechen sie natürlich sehr zugunsten der Sexualitätshypothese.

Die Spermatien entstehen in besonderen Behältern, den Spermogonien (Fig. 10a) und unterscheiden sich dadurch von den meist frei auf der Oberfläche vorkommenden Conidien der Askomyceten. Man nennt sie deshalb, wenn man den Standpunkt betonen will, daß es sich um asexuelle Fortpflanzungsorgane handele, Pycnoconidien und ihre Bildungsstätten Pycniden. Die Spermogonien oder Pycniden sind rundliche oder flaschenförmige Höhlungen im Flechtenkörper, die entweder eingesenkt sind, oder papillenartig aus dem Thallus hervorragen. In der Flächenansicht bemerkt man von ihnen gewöhnlich nichts als ein kleines schwarzes Fleckchen, das ist das Ostiolum, eine enge Oeffnung, durch die sie mit der Außenwelt

in Verbindung stehen. Die Spermogonien haben eine feste Wand, die ihre Höhlung von dem Thallusgewebe scheidet. Aus dieser Wand entspringen die vielfach verzweigten Traghyphen (Fig. 10b), die an sehr feinen Auswüchsen die Spermatien ab-

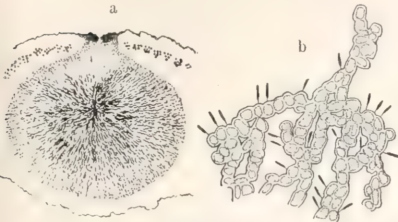


Fig. 10. Spermogonium (a) und Traghyphen mit Spermatien (b) von Sticta pulmonacea. Nach Glück.

schnüren. Nach dem Bau der Traghyphen lassen sich eine Reihe von Typen konstatieren, die man zum großen Teile bei den Askomyceten nicht antrifft. Deswegen wird man Spermogonien als charakteristische Organe der Flechten bezeichnenen müssen, wenn wir auch über ihre physiologische Bedeutung einstweilen nichts Endgültiges sagen können.

Die Pilzkomponente ist nicht befähigt, die ganze Flechte zu vermehren, die aus den Schlauchfrüchten meist ausgeschleuderten Sporen müssen erst mit ihren Keimschläuchen (s. unten) die richtigen Algen aufsuchen, das gelingt nicht allen, viele gehen dabei zugrunde und deshalb hat vielleicht die Verbreitung durch die Sporen an Bedeutung verloren. Manche Apothecien bilden gar keine Sporen mehr aus und viele Flechtenarten tragen selten oder nie Apothecien. An ihre Stelle sind in vielen Fällen die Soredien getreten, eine ganz spezifische Neuerwerbung. Zwecks Bildung derselben zerfällt der Thallus der Flechten meist partiell in Körperchen, die aus einigen von Pilzhyphen umsponnenen Algenzellen bestehen (Fig. 11b); sie enthalten somit gleich beide Komponenten und können unter günstigen Bedingungen sofort zu einer neuen Flechte auswachsen.

Die Soredien werden häufig in besonderen, scharf umschriebenen Brutstätten, den Soralen (Fig. 11a) gebildet.

Da man bei den Pertusariaceen die Entwickelung der Sorale auf bestimmte Hyphenbildungen zurückführen konnte, die in ihren chemischen Reaktionen mit den Carpogonhyphen übereinstimmen, so hat man die Theorie aufgestellt, daß die Sorale metamorphosierte Apothecien seien. Dieser Auffassung stehen aber mancherlei Schwierigkeiten entgegen. Zunächst haben die Primärhyphen der Sorale in ihrer Gestalt wenig Aehnlichkeit mit den gewundenen Carpogonen. Außerdem führt die Theorie zu der

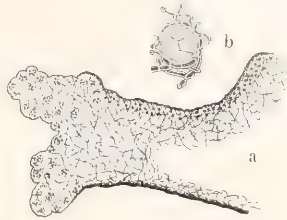


Fig. 11. Soral (a) und Soredium (b) von Parmelia physodes. a nach Bitter.

gezwungenen und unwahrscheinlichen Vorstellung, daß die vielen nicht in Soralen entstehenden Soredien mit den anderen nicht homolog sind. Dann darf auch nicht unerwähnt gelassen werden, daß die stillschweigende Voraussetzung der Theorie, die Soredien seien, als die eigentlich charakteristischen und den Bedürfnissen der Flechten am besten entsprechenden Fortpflanzungsorgane, auf dem Wege, die Apothecien allmählich völlig zu verdrängen, durchaus nicht unbestritten ist. Es wird nämlich die Soredienbildung auch als bloße Reaktion auf besondere äußere Verhältnisse aufgefaßt: Wenn das Feuchtigkeitsoptimum einer bestimmten Flechtenart dauernd überschritten wird, sollen die Algen soviel besser wachsen als der Pilz, daß sie die Rinde durchbrechen und als graugrüner Soredienstaub hervorquellen. Tatsache ist, daß die Algen in den Soralen viel stärker wuchern als in anderen Thallusteilen, und daß die Soredienbildung hauptsächlich an dunklen, feuchten Standorten zu finden ist. Auch kommen die keimenden Soredien an solchen Orten häufig nicht zu richtiger Thallusbildung, sondern wuchern in ihrer Entwickelungsform weiter, wobei sie oft große Flächen mit ihren staubigen Massen in leuchtenden Farben bedecken, was als Leprabildung bekannt ist.

Ein anderes Produkt lebhafter Algenwucherung stellen vielleicht die Isidien dar, die deshalb hier angeschlossen sind, obwohl ihre Funktion als vegetative Fortpflanzungskörper nicht erwiesen ist. Es sind warzen-, zapfen- oder korallenartige Auswüchse der Tallusoberfläche, die auch von Algen angefüllt, aber im Gegensatz zu den Soralen von der Rinde bedeckt sind. Sie werden einerseits als den Soralen homologe Gebilde aufgefaßt, bei denen die Thallusrinde nur elastisch und wachstumsfähig

genug war, um beim Vordringen der Algen nicht zu zerbrechen, andererseits als Wucherungen der Flechtenrinde, bei der die Algen nur eine sekundäre Rolle spielen.

Aus alledem geht wohl hervor, daß über die Natur der Soredien und Isidien, ihr Verhältnis zu den Apothecien usw. noch große Unklarheit herrscht.

5. Die Synthese der Flechten. Die Meinung, daß die Flechten Doppelorganismen darstellen, wurde zuerst hypothetisch von de Bary, dann mit großer Sicherheit von Schwendener ausgesprochen. Diese Forscher wie auch Bornet gründeten ihre Auffassung in erster Linie auf die mikroskopische Analyse des Flechtenthallus und auf die bereits damals bekannte Tatsache, daß die grünen Zellen nicht bloß außerhalb des Thallus wachsen, sondern hier auch eigene Fortpflanzungsorgane bilden.

Der erste wohl, der kleine Flechten erzog, war Rees. Stahl verfolgte wie die Keimfäden, welche aus den Ascosporen einer Flechte hervorgegangen waren, sich mit den Algen der gleichnamigen Flechten vereinigten, Möller brachte den Pilz mancher Flechten auf Nährlösung zum Wachsen und beobachtete auch die Bildung von Spermogonien. Die umfassendsten Versuche aber machte Bonnier, indem er in sorgfältiger Reinkultur in der freien Natur gesammelte Algen mit den Pilzen kombinierte, die er aus Flechtensporen gezogen hatte. In mehrjähriger Kultur erhielt er auch Fruchtkörper. Bonniers Versuche waren deswegen wichtig, weil sie ganz dem entsprechen, was im Freien vor sich geht. Wir wiesen ja schon oben darauf hin, daß die keimenden Pilze mit der zufälligen Auffindung von Algen rechnen müssen. Solchen Unsicherheiten entgeht eine nicht übermäßig große Anzahl von Formen, welche Hymenialgonidien besitzen. Mit dem Namen Hymenium bezeichnet man die Schlauchschicht, der

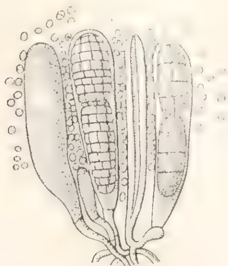


Fig. 12. Hymenialgonidien von Endocarpon pusillum. Nach Stahl.

wir oben den Namen Thecium gaben und Gonidien hießen in alter Zeit die Algenzellen. Diese letzteren sitzen zwischen die Schläuche und Paraphysen eingeklemmt (Fig. 12); sie werden ausgeschleudert, wenn die Schlauchsporen aus ihren Behältern hervorschießen, so daß dann auf dem Substrat Algen und Pilzsporen gleich beisammen liegen. Die keimenden Sporen erreichen mit ihren Schläuchen schon nach ganz kurzer Zeit die Algen.

Bei allen Flechten bilden die wachsenden Pilzfäden (Fig. 13) fast in dem Moment, in



Fig. 13. Gekeimte Spore (sp) von Xanthori parietina, a Algen. Nach Bornet.

welchem sie mit den Algen in Berührung kommen, kurze Ausstülpungen, welche wie Krallen um die Algen herumgreifen. Diese ihrerseits reagieren ebenfalls auf die Berührung, indem sie sich vielfach erheblich vergrößern und oft ist ein augenfälliger Unterschied zwischen den berührten und unberührten Algen nachweisbar. Das Ergreifen resp. Umspinnen der Algenzellen erfolgt bei der Keimung wie auch später in den erwachsenen Flechtenkörpern selber in etwas verschiedener Weise. Entweder ist der Verband ein lockerer, so daß Hyphen und Algen anscheinend unabhängig durcheinander wuchern (z. B. bei manchen Collemaceen), oder die Zweige der Hyphen legen sich eng an die einzelnen Algen an oder drittens sie treiben dünne Aestchen in die Algenzellen hinein. Von dem zweiten Fall, der wohl der häufigste ist, kennt man zwei Modifikationen; bei der einen preßt sich das Hyphenende mit einer knopfartigen Verbreiterung an die Alge an (Fig. 14a) und bei der anderen wird sie von mehreren kleinen Zweigen umklammert, wie der Ball von der Hand (Fig. 14b). In dem dritten Fall lassen sich einfache Haustorien unterscheiden, die mit einem einzigen

Zapfen die Membran durchbohren (Fig. 14c), und solche, die mit einem komplizierten Netz von Hyphenfädchen den ganzen Algenprotoplasten durchwuchern (Fig. 14d).

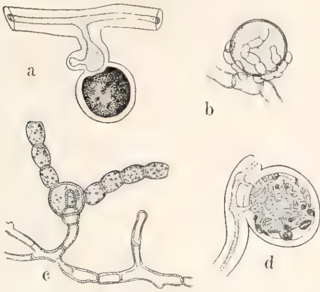


Fig. 14. Verschiedene Typen der Vereinigung von Pilzhyphen und Algenzellen. a und d nach Danilow b und c nach Bornet.

Im allgemeinen wachsen die Flechtenpilze nur dann weiter, wenn sie bestimmte Algenformen treffen, auf die sie einmal angewiesen sind. Es kommt aber auch vor, daß ein Pilz sich mit mehreren Algen vereinigt. Das klassische Beispiel hierfür hat Möller geliefert, indem er nachwies, daß die früher systematisch weit getrennten Basidiolichenen Cora und Dictyonema, von einem Pilz, einer Thelephoree, gebildet werden. Welche von den Flechten entsteht, hängt ab von den Algen, mit denen sich der Pilz vereinigt hat. Mit Chroococcus bildet er Cora, mit Scytonema die Gattung Dictyonema. Ein einzelnes Individuum der Thelephora kann gleichzeitig mit den beiden Algen in Symbiose treten und daneben noch partiell farblos bleiben.

Welche Wuchsform zur Ausbildung gelangt, hängt sonach von den Algenfäden ab: „Sie führen mit dem Pilz einen Kampf um den formbestimmenden Einfluß auf das Gesamtwesen und je nach den äußeren Umständen sind sie in diesem Kampfe Sieger oder Unterliegende. Handelt es sich um freie Ausbildung in der Luft, so ist der Pilz unbestrittener Herrscher, geht aber die Flechte auf feste Unterlage über, so gewinnen die Algen die Oberhand, sie bestimmen die Formausbildung allein und der Pilz wird ihr folgsamer Begleiter."

Bei den Ascolichenen kommt ähnliches vor. Es handelt sich dabei immer um Flechten, die hauptsächlich Chlorophyceen enthalten, aber gelegentlich oder auch regelmäßig kleinere Mengen von Cyanophyceen einschließen. Diese sind entweder in das Gewebe eingesenkt, oder ragen köpfchenförmig hervor, woher ihr Name Cephalodien rührt.

Diese leichte Anpassungsfähigkeit der betreffenden Pilze an verschiedene Algen ist gegenüber der sonstigen strengen Spezialisierung der Askolichenen auffällig, wird aber verständlich, wenn man hört, daß besonders diejenigen Gattungen zur Cephalodienbildung neigen, von denen man Parallelformen mit chlorophyllgrünen und blaugrünen Algen kennt, wie z. B. Peltigera und Sticta. Physiologisch könnten die Cephalodien insofern wertvoll sein, als sie mit ihren blaugrünen Algen vielleicht Teile des Spektrums für die Assimilation ausnutzen können, die für die grünen Algen nicht mehr in Betracht kommen. Da die cephalodientragenden Flechten zu den wenigen Formen gehören, die auch an schattigen Orten noch fortkommen, so wäre der Nutzen der Doppelsymbiose um so einleuchtender.

Klarer zu übersehen sind im allgemeinen die Fälle, wo zwei Pilze mit einer Algenart den Flechtenthallus bilden. Es gibt da zwei Möglichkeiten, entweder die beiden Pilze nutzen gleichzeitig die Algen aus: Parasymbiose, oder nacheinander: Allelositismus. Bei der Parasymbiose siedelt sich auf einer voll entwickelten Flechte ein neuer Pilz an, z. B. Rhymboricarpus punctiformis auf Rhizocarpon geographicum. Der neue Symbiont umspinnt neben dem ursprünglichen Pilz die Algen, ohne die Flechte wesentlich zu schädigen. Wenn der zweite Pilz den ersten dagegen abtötet, um dann dessen Algen zu adoptieren, so spricht man von Allelositismus.

Hier schließen sich die echten Flechtenparasiten an, die von vornherein zerstörend auf ihren Wirt wirken. Es sind meistens Askomyceten, manchmal aber auch Flechten, die parasitisch auf anderen Flechten leben, so ist z. B. Lecanora atriseda nur als Parasit auf Rhizocarpon geographicum bekannt.

Es fragt sich nun, wie wir dieses Zusammenleben physiologisch aufzufassen haben. Man stellt gewöhnlich die Flechten als das typische Beispiel der mutualistischen Symbiose hin, bei der die autotrophe Alge die Kohlenhydrate und der heterotrophe Pilz das Wasser und die anorganischen Nährsalze für den gemeinsamen Haushalt liefern soll. Der Pilz ist also ganz auf die Symbiose angewiesen; daß aber auch die Alge nicht ohne den Pilz leben könne, schien sich in folgendem zu zeigen. Die Alge, die in Symbiose mit dem Pilz von Xanthoria parietina und von vielen anderen höheren Flechten lebt, sollte nach Beijerinck und Artari als Stickstoffquelle Pepton nötig haben, und dieses sollte ihr eben durch den Pilz zur Verfügung gestellt werden. Da aber in

neuester Zeit von Treboux Fehlerquellen in den Untersuchungen, die sich auf diese Verhältnisse beziehen, gefunden sind, so bleibt der Nutzen, den die Alge aus dem Zusammenleben haben könnte, ein etwas problematischer. Wenn man diesen Umstand zusammenhält mit dem Vorkommen von intrazellularen Haustorien, so wird man mit der Möglichkeit rechnen müssen, daß wir in den Flechten einen Fall von antagonistischer Symbiose vor uns haben. Wir können wohl nicht direkt von Parasitismus sprechen, weil die Algen im ganzen nur sehr wenig geschädigt scheinen. Wahrscheinlich kommen diejenigen der Wirklichkeit am nächsten, die das Verhältnis als Helotismus bezeichnen. Dadurch scheint mir am besten ausgedrückt, wie fein die Beziehungen zwischen den beiden Komponenten abgestimmt sind: Einerseits erlaubt der Pilz der Alge sich bis zu einem gewissen Grade normal zu entwickeln, zu wachsen und sich zu teilen, ja er bildet sogar — wie wir noch eshen werden — besondere Organe aus, um die Assimilation der Algen zu erleichtern; andererseits weiß der Pilz die Entwickelung der Algen ganz genau seinem eigenen Wachstum anzupassen, so daß schließlich alle ihre Assimilate ihm wieder zugute kommen. Er gleicht einem klugen Herren, der seine Sklaven gut füttert, damit er sie dann um so besser ausnutzen kann.

Die Beziehungen zwischen Pilz und Alge sind aber nicht bloß ernährungsphysiologischer Natur, auch die Reizphysiologie spielt hinein. Wir wissen z. B., daß die oben genannte Telephora, wenn sie durch Erfassen der Algen zu Dictyonema wird, sich annähernd senkrecht zu dem einfallenden Lichtstrahl stellt, daß sie sich aber im Licht aufrichtet, wenn sie ohne die Algen lebt. Im übrigen ist freilich die Reizphysiologie der Flechten noch wenig erforscht.

6. Lebenserscheinungen. Die Flechten sind bekannt als die „Pioniere der Pflanzenwelt", weil sie die extremsten Standorte, wo keine andere Pflanzengruppe mehr Fuß fassen kann, mit Vorliebe besiedeln. Auf den höchsten Felsklippen der Gebirge, in den Tundren der Polarländer, wenn sie nur einige Monate schneefrei sind, auf den trockensten Baumrinden — überall finden sich Flechten. Es sind zwei Eigenschaften, die sie hierzu befähigen, erstens die eigene Assimilationsfähigkeit, die sie nicht wie die Pilze von den Nährstoffen der Unterlage abhängig machen, und zweitens ihr außerordentlich geringes Wasserbedürfnis. Besonders dieses letztere ermöglicht ihnen ihre eigenartige Lebensweise, denn alle häufigeren Standorte der Flechten sind trocken; man denke nur an Mauern, Dächer, Heiden, Straßendämme, wo sie außer an den oben genannten hauptsächlich vorkommen. Solche Stellen sind auch in Gegenden mit reichlicheren Niederschlägen physiologisch trocken, d. h. bald nachdem der Regen aufgehört hat, ist alles Wasser abgelaufen oder verdunstet. Die Flechte ist also im wesentlichen auf das herabfallende Regenwasser angewiesen oder den eben gebildeten Tau. Diese Flüssigkeitsmengen kann sie nun aber wegen ihrer leichten Benetzbarkeit auch völlig ausnutzen. Jeder Tropfen, der auf eine trockene Flechte trifft, dringt sofort ein. Dies hat natürlich wieder den Nachteil, daß das Wasser nicht gespeichert werden kann: ebenso schnell wie es bei Regen eindringt, verdunstet es bei Sonnenschein. Wenn nun auch, wie man behauptet hat, manche Flechten vielleicht Wasser in Dampfform aufnehmen können — es soll bis 37% des Gewichtes hygroskopisch eindringen — so werden im allgemeinen doch Perioden von Wasserüberfluß mit solchen völliger Austrocknung schroff und häufig abwechseln. Diese Trockenheitsperioden können die Flechten unter Umständen sehr gut monatelang aushalten, aber sie sind nicht, wie man wohl gemeint hat, notwendig für ihr Gedeihen. Da man sie in der Kultur in mäßig feuchtem Zustande dauernd halten kann, würden sie wahrscheinlich in der freien Natur an entsprechenden Stellen wachsen können, wenn sie dort nicht durch die Konkurrenz schneller wachsender Pflanzen verdrängt würden. Die Flechten gehören nämlich zu den am langsamsten wachsenden Pflanzen, die man kennt. Zum Teil sind daran natürlich wieder ihre erschwerenden Lebensbedingungen schuld, aber auch wenn man eine verhältnismäßig schnell wachsende Peltigera in einer feuchten Kammer in Kultur nimmt, erhält man nicht mehr als 3 bis 4 cm Jahreszuwachs. In der freien Natur sind die Werte sehr viel geringer und man geht wohl nicht fehl, wenn man handgroße Flechtenthalli an alten Bäumen für ungefähr ebenso alt schätzt, wie den Baum selbst, oder mehrere Dezimeter dicken Cladoniarasen Hunderte von Jahren gibt.

Neben dem langsamen Wachstum gibt es noch eine Eigentümlichkeit, die den Flechten oft verhängnisvoll wird, das ist ihre Empfindlichkeit gegen Verunreinigungen der Luft. Auch an den ältesten Bäumen städtischer Parks, oder in industriellen Gebieten findet man keine Flechten. Erst wenn man das Weichbild der Stadt verläßt, treten sie, zuerst in kümmerlichen Exemplaren, wieder auf.

Gute Luft ist also eine der Hauptbedingungen der Flechtenvegetation. Eine andere ist helles Licht. Davon kann man sich an jedem Waldrande überzeugen. Während die Lichtseiten der Randbäume dicht

mit Flechten bewachsen sind, findet man an den nächsten Bäumen schon weniger und im dichten Bestand fast gar keine Flechten mehr. Natürlich gilt dies nicht unterschiedslos für alle Formen, es gibt auch, wie schon gelegentlich erwähnt wurde, Flechten, die an schattigen Standorten fortkommen, aber das ändert nichts daran, daß man die Flechten im ganzen als eine lichtliebende Pflanzengruppe bezeichnen muß.

Wir haben verschiedentlich die Unabhängigkeit der Flechten vom Substrat erwähnt und ihr Verhalten in Gegensatz zu dem der Pilze gestellt. Wir sahen auch, daß dieser Zustand erst allmählich erreicht wird, und daß die Krustenflechten noch in enger Verbindung mit der Rinde oder dem Stein stehen, auf dem sie wachsen. Aber auch bei denjenigen Rindenflechten, die ziemlich tief in ihre Unterlage eindringen, vermögen die Hyphen nicht die Zellulosewände zu durchbohren, sie halten sich vielmehr an vorhandene Interzellulargänge und sonstige Lücken. Demgemäß vermögen sie keine lebenden Zellen zu töten und sie können den Bäumen nur schaden, wenn diese kümmerlich wachsen. Dann übertrifft der jährliche Zuwachs an Flechten den an jungem Holz, so daß auch die kleinsten Zweige von ihnen eingehüllt und in ihren Funktionen gehemmt werden.

Sehr interessant ist das Verhältnis der Steinflechten zu ihrem Substrat. In Kalkstein dringen die an ihn angepaßten Flechten bis zu 2 cm Tiefe ein, und versenken ihren Thallus oft soweit, daß nur die Oeffnungen der Fruchtkörper herausschauen. Es ist das nur durch die Annahme zu erklären, daß die Hyphen Säuren ausscheiden, die den Kalk lösen. Mit dem Gehalt an kohlensaurem Kalk in dem Substrat wird eine anatomische Eigentümlichkeit in Verbindung gebracht, die sich hauptsächlich bei Kalkflechten findet, die Sphäroidzellen oder Oelhyphen. Es sind angeschwollene Zellen oder Zellreihen, die ein fettes Oel enthalten. Nach der einen Auffassung ist es ein Exkret und entsteht aus der Kohlensäure, die bei der Zersetzung des Calciumkarbonats durch die Flechtenhyphen frei wird. Nach der anderen stellt das fette Oel einen Reservestoff dar, weil es vereinzelt auch bei Flechten vorkommt, die auf einem an kohlensaurem Kalk armen Substrat wachsen. Aber nicht nur der verhältnismäßig weiche Kalkstein wird von den Flechten angegriffen, sondern auch die auf Urgestein vegetierenden ätzen ihre Unterlage an. Sicher ist, daß Glimmer, aber auch Orthoklas und Granat, und wahrscheinlich, daß Quarz von den Flechtenhyphen angegriffen werden. So sind die Flechten nicht nur in dem Sinne „Pioniere“, daß sie die ersten Pflanzenvertreter sind, die ein jungfräuliches Gebiet besiedeln, sondern auch insofern als sie dieses Erdreich zersetzen helfen und für höhere Pflanzen bewohnbar machen.

Dieses Verhalten der Steinflechten zu ihrem Substrat ist ein Hinweis auf den komplizierten Chemismus im Flechtenkörper, dessen wichtigste Produkte die Flechtensäuren sind. Dies sind spezifische Flechtenstoffe, die im Stoffwechsel anderer Pflanzen nicht vorkommen, von säureartigem Charakter. Man hat allmählich etwa 150 Flechtensäuren kennen gelernt, davon gehören zwei Drittel der aromatischen Reihe und ein Drittel der Fettreihe der Kohlenwasserstoffe an. Die Frage, wie diese spezifischen Flechtenprodukte durch die Tätigkeit der Symbionten zustande kommen, ist noch ungelöst, wenn auch Tobler vielleicht den Anfang dazu gemacht hat. Er fand, daß Reinkulturen des Pilzes von Xanthoria parietina das für die Flechte charakteristische Parietin nicht bilden können. Die Säure trat erst auf, wenn er seinen Kulturen die Algenzellen zufügte. Jedenfalls sind es für den Stoffwechsel nicht mehr in Betracht kommende Exkrete, die in Kristallform außen an den Hyphen abgeschieden werden. Man hat die Flechtensäuren als Schutzmittel gegen Tierfraß betrachtet, aber das ist, wenn nicht ganz unrichtig, doch nur in sehr beschränktem Maße der Fall. Bei reichlicherem Vorkommen sind sie häufig durch schöne mikrochemische Farbreaktionen leicht kenntlich. Das gibt ihnen bei ihrer weiten Verbreitung über die ganze Gruppe — mit Ausnahme der Gallertflechten — eine gewisse systematische Bedeutung. Besonders seitdem nachgewiesen ist, daß innerhalb kleinerer oder größerer systematischer Einheiten gewisse, oft höchst auffällige, chemische Uebereinstimmungen, andererseits auch wieder auffällige, Verschiedenheiten auftreten. Man hat diese Beziehungen bestritten, weil das Vorkommen der Flechtensäuren von dem Substrat abhängig sei. Aber es ist heute wohl sicher, daß geographische Verbreitung, Art der Unterlage und Jahreszeit wohl für die Quantität, aber nicht für die Qualität der in den Flechten auftretenden Säuren von Bedeutung ist (Zopf).

Nicht nur die Exkrete der Hyphen sind spezifische Flechtenprodukte, sondern auch die Hyphen selbst weisen charakteristische chemische Eigentümlichkeiten auf. Ihre Grundlage ist wohl ein Kohlenhydrat, das sich auch in den Pilzmembranen findet, die Pilzzellulose. Im weiteren Verlauf der Entwickelung erfahren aber die Membranen sehr vieler Flechtenhyphen chemische Umwandlungen. Als solche ist besonders das Lichenin bekannt.

Nach neuen Untersuchungen von Sernander ist die von uns betonte Unabhängig-

keit der Flechten vom Substrat insofern eingeschränkt, als er gezeigt hat, daß manche Flechten auf von außen zugeführte Nährstoffe angewiesen sind. Sie finden sich nur an Stellen, wo reichliche Stickstoffmengen zur Verfügung stehen: nitrophile Flechten.

Um den kurzen Abriß von den Lebenserscheinungen derFlechten wenigstens einigermaßen vollständig zu machen, müssen wir hier vor allem noch das erwähnen, was wir über den Gasaustausch wissen. Bei der Assimilation zersetzen die Algen die Kohlensäure und produzieren Sauerstoff. Der Pilz und auch die Algen verbrauchen dagegen Sauerstoff bei der Atmung und scheiden Kohlensäure aus. Das sind dieselben Vorgänge, wie wir sie von den höheren Pflanzen kennen, während dort aber fest steht, daß die belichteten assimilierenden Blätter mehr CO_2 zersetzen als durch die Atmung produziert ist, widersprechen sich die betreffenden Angaben für die Flechten. Der Gasaustausch ist abhängig vom Wassergehalt, wird bei Lufttrockenheit sistiert und tritt in der Regel auch nicht wieder auf, wenn die Trockenheitsperiode über drei Monate dauert. Die Intensität des Gasaustausches steigt mit dem Wassergehalt, ihr Optimum liegt aber vor dem maximalen Wassergehalt. Viel geringer ist die Abhängigkeit von der Temperatur. Das Minimum der Atmung liegt bei -10^0 C, das der Assimilation gar erst bei -30^0 bis -35^0 C. Das Maximum der CO_2-Zersetzung liegt bei $+50^0$ C, während die Atmung bis zu 60^0 C hinauf fortgeht. Diese Anpassung des Gaswechsels an extreme Temperaturen kommt den oft schroffem Wechsel von Hitze und Kälte ausgesetzten Flechten natürlich sehr zustatten.

7. Geographische Verbreitung und systematische Gliederung. Aus dem, was wir über die Lebenserscheinungen derFlechten gesagt haben, ergibt sich, daß sie in dauernd trockenem und feuchtwarmem Klima nicht besonders gedeihen können. In dem einen leiden sie unter Wassermangel und im anderen unter der Konkurrenz der üppig und schnell wuchernden höheren Vegetation. Deshalb sind die Wüsten fast ohne Flechten und Guyana z. B. dürfte kaum mehr als 200 Species enthalten, während Deutschland mindestens 1200 besitzt. Die Hauptmasse der Flechten findet sich in den gemäßigten und kalten Zonen und je mehr man sich den Polen nähert, um so zahlreicher werden die Erd- und Steinflechten gegenüber den Rindenbewohnern, bis schließlich weite Länderstrecken, wie die nordischen Tundren, nur von Flechten bedeckt werden. Dabei ist die Artenzahl keine besonders große; dafür besitzen die einzelnen Arten eine sehr weite Verbreitung, manche kommen auf der ganzen Erde vor, und die meisten deutschen Rinden- und Holzflechten sind in ganz Europa heimisch.

Die Systematik der Flechten ist von jeher ein schwieriges und unsicheres Gebiet gewesen, was sich darin dokumentiert, daß schon von den alten Lichenologen fast jeder sein eigenes System besaß. Seitdem wir wissen, daß zwei so verschiedene Pflanzengruppen, wie Algen und Pilze sich in ihnen vereinigt finden, ist die Verwirrung noch schlimmer geworden. Die Einteilung in zwei, allerdings sehr ungleiche Gruppen, die Asko- und Basidiolichenen ergibt sich von selbst. Die Schwierigkeiten beginnen erst bei der weiteren Einteilung der Askolichenen. Da sie eine ganze Reihe verschiedener Algen enthalten, so ist es klar, daß die Symbiose nicht einmal, sondern mehrfach entstanden ist. Die Askolichenen sind also eine polyphyletische Gruppe, deren Einteilung nach einem einheitlichen Gesichtspunkt unmöglich ist. Am natürlichsten wäre offenbar eine völlige Auflösung der Flechten als systematische Einheit und Anschluß der einzelnen Formen an die Pilzfamilien, aus denen sie entstanden sind. Da die Flechten sich aber als solche weiter entwickelt haben, so ist es einstweilen in den meisten Fällen nicht möglich, den Zusammenhang mit den zugehörigen Pilzen festzustellen. Man wird also aus Zweckmäßigkeitsgründen die systematische Klasse Lichenes beibehalten, und bei ihrer Gliederung insofern einen Kompromiß eingehen müssen, als man auch den Algen eine gewisse Wichtigkeit zuerkennt.

Als Beispiel sei im folgenden das System von Reinke mitgeteilt, unter Benutzung einer Zusammenstellung von Darbishire.

I. Unterklasse: Coniocarpi. Die Schlauchschicht ist staubig aufgelöst.

II. Unterklasse: Discocarpi. Die Schlauchschicht bildet eine offene Scheibe.

Reihe 1. Grammophori. Apothecium mehr oder weniger langgestreckt. In Symbiose mit Chlorophyceen.

Reihe 2. Lecideales. Apothecien radiär. Ohne Algen im Gehäuse. In Symbiose mit Chlorophyceen.

Reihe 3. Parmeliales. Apothecium radiär. Mit Algen im Gehäuse. In Symbiose mit Chlorophyceen.

Reihe 4. Cyanophyli. In Symbiose mit Cyanophyceen.

III. Unterklasse: Pyrenocarpi. Mit krugförmigen Fruchtkörpern.

Literatur. *Es sind nur einige grundlegende Werke angeführt. Weitere Nachweise finden sich in der Bearbeitung der Flechten in den „Natürlichen Pflanzenfamilien“ von* **Engler und Prantl,** *I. Teil, Abt. 1*, Leipzig 1907.* — **G. Bonnier,** *Recherches sur la synthese des Lichens. Annal. des Sciences VII. Ser. Botanique* 9, *1889.* — **Ed. Bornet,** *Recherches sur les*

gonidies des lichens. Annal. des Sciences. V. Sér. Botanique 17, 1878. — **A. Möller,** *Ueber eine Thelepheree, welche die Hymenolichenen Cora, Dictyonema und Laudatea bildet. Flora, 25, 1893.* — **J. Reinke,** *Abhandlungen über Flechten. Jahrb. f. wiss. Bot., 26, 28, 29, 1894 bis 1896.* — **S. Schwendener,** *Untersuchungen über den Flechtenthallus. Nägelis Beiträge zur wissensch. Bot. Heft 2 bis 4. Leipzig 1860 bis 1868.* — **Derselbe,** *Die Algentypen der Flechtengonidien (Programm f. d. Rektoratsfeier der Universität). Basel 1869.* — **E. Stahl,** *Beiträge zur Entwickelungsgeschichte der Flechten. Heft I und II. Leipzig 1877.*

W. Nienburg.

c) Zusammenleben von höheren Pflanzen mit Pilzen und Bakterien.

A. Pflanzen und Bakterien. 1. Die Wurzelknöllchen der Leguminosen. 2. Die Wurzelknöllchen der Erlen und anderer Gewächse. 3. Bakterienknoten auf Laubblättern von Rubiaceen und Myrsinaceen. B. Pflanzen und Fadenpilze (Mycorrhizen). 1. Allgemeines und Geschichte. 2. Endotrophe Mycorrhiza. a) Pilzmycel mit regelmäßiger Querwandbildung. Resorption von Hyphenknäueln. Entstehung von Klumpen: Orchideen. b) Mycel mit regelmäßiger Querwandbildung. Keine Resorption von Pilzelementen: Ericaceen und Pirolaceen. c) Mycel ohne regelmäßige Querwandbildung. Resorption von Hyphenendigungen. Entstehung von Sporangiolen: Pflanzen mit Sporangiolenpilzen. d) Mycel ohne regelmäßige Querwandbildung; keine nachgewiesene Resorption von Pilzelementen: Lycopodiaceen. e) Mycel ohne regelmäßige Querwandbildung. Keine Resorption von Pilzmycel: Jungermanniaceen. 3. Ectotrophe Mycorrhiza. C. Pflanzen und Fadenpilze (Nichtmycorrhizen). Lolium temulentum und sein Pilz.

A. Pflanzen und Bakterien.

1. Die Wurzelknöllchen der Leguminosen. Die Leguminosen, d. h. die Familien Papilionaceae, Caesalpiniaceae und Mimosaceae nehmen in der Natur anderen Gewächsen gegenüber eine bevorzugte Stellung ein. Während diese ihren zum Aufbau ihres Körpers nötigen Stickstoff mit dem aus dem Boden aufgenommenen Wasser in Form anorganischer Salze erhalten, steht den Leguminosen außer diesem Weg noch ein anderer zum Gewinn des Stickstoffs offen, den sie der Symbiose mit gewissen, den freien Stickstoff der Atmosphäre assimilierenden Bakterien verdanken. Dieser Assimilationsprozeß kommt allen Organismen direkt oder indirekt zugute und ist von weittragender Bedeutung für den gesamten Kreislauf des Stickstoffs in der organischen Welt.

Der Leguminosensame enthält viele von der Mutterpflanze stammende Reservestoffe, vermöge deren er selbständig keimt. Das junge Pflänzchen tritt mit den im Boden allenthalben vorhandenen Bakterien in Verbindung, die auf stickstoffarmem oder stickstofffreiem Boden ihre volle Wirksamkeit entfalten, und der Pflanze üppiges Gedeihen ermöglichen.

Der Sitz der Bakterien sind die „Wurzelknöllchen", das sind Anschwellungen, die Seitenwurzeln einer Hauptwurzel homolog sind und nur in einem Fall (Lupine) an dieser selbst entstehen. Ihre Form variiert mit den einzelnen Pflanzengattungen beträchtlich, es gibt kugelige (Fig. 1), verlängerte,



Fig. 1. Wurzelknöllchen von Lotus corniculatus.

flache, handförmig geteilte und andere Formen von Knöllchen.

Die von den im Boden vorhandenen Bakterien ausgehende Infektion erfolgt in den bis jetzt untersuchten Fällen durch die Wurzelhaare. In ihnen bemerkt man schleimige, bakteriengefüllte Schläuche, die, in das Rindengewebe der Wurzel hineinwachsend und sich dort verzweigend, die Zellen zum Wachstum anregen. Mit der Vermehrung der Zellen geht parallel eine solche der Bakterien, die die Zellen des neuentstandenen Gewebes (Bakteroidengewebe)

dicht anfüllen. Hier erleiden sie unter reicher Kohlenhydraternährung seitens der Pflanze die Umwandlung zu Bakteroiden. Die einfachen stäbchenförmigen Bakterien verwandeln sich in vielmal größere verzweigte Gebilde (Fig. 2). Von diesem Zeitpunkt an



Fig. 2. Bacterium radicicola aus Vicia Faba. Entstehung der Bakteroiden nach Beijerink.

beginnt die Anreicherung des Knöllchengewebes an Stickstoff, die sich durch quantitative Analyse der Knöllchen nachweisen läßt (Stoklasa).

Die Bakteroiden sind nach Hiltner die Erzeuger und Ueberträger des gebundenen Stickstoffs. Früher betrachtete man sie als Involutionsformen, d. h. pathologisch veränderte Zellen; dagegen sprach jedoch ihre lange Persistenz und die Fähigkeit, sich unter geeigneten Bedingungen wieder zu normalen Bakterien zu regenerieren. Zudem gelang es auch, ihre Ausbildung in Reinkultur durch Uebterernährung mit Kohlenhydraten künstlich hervorzurufen. Sie scheinen also zwar hypertrophierte, aber gesunde Zellen zu sein.

Veränderungen des protoplasmatischen Inhaltes der Bakteroiden zu Beginn ihrer Tätigkeit lassen auf die Entstehung einer von der Pflanze assimilierten Substanz schließen. Ein mit Jodlösung rotbraun färbbarer Stoff wird beobachtet, der sich, wenn etwa durch eine Verletzung die Abführwege nach der Pflanze versperrt sind, in großer Menge anhäufen kann (Hiltner und Störmer).

Nach neuesten Untersuchungen von Peclo stammt dieser Stoff vielleicht aus Resten fadenförmiger Bakterienelemente, die bei der durch Fragmentation erfolgenden Ausbildung der Bakteroiden (Arthrosporen) übrig bleiben und von der Pflanze resorbiert werden.

Die auf diese Verhältnisse zurückzuführende Sonderstellung der Leguminosen vor anderen Gewächsen war schon im Altertum insofern bekannt, als man wußte, daß ein Acker nach der Ernte von Luzerne oder Wicken nicht gedüngt zu werden brauchte. Später teilte man die Kulturpflanzen in „bodenbereichernde" und „bodenzehrende", Leguminosen und Cerealien ein. Die von Liebig ausgehenden fundamentalen Veränderungen der Anschauung vom Chemismus der Pflanze lösten eine genauere Untersuchung aus, die zur Folge hatte, daß man hinfort die Leguminosen als Stickstoffmehrer, die Getreidearten als Stickstoffzehrer bezeichnen konnte.

Die Herkunft dieses von der Pflanze erworbenen und dem Ackerboden trotz der Ernte mitgeteilten Stickstoffes blieb lange Zeit unbekannt. Die Praxis lieferte nichtsdestoweniger immer neue Belege (Schulz-Lupitz 1883). Die klassischen Forschungen von Hellriegel und Willfahrt (1888) brachten Licht in die Sache und schufen die Grundlage zu unserer heutigen Anschauung. Willfahrt wies nach, daß die Leguminosen in Symbiose mit gewissen Arten von Bodenbakterien fähig sind in Ermangelung jeden gebundenen Stickstoffs solchen dennoch aufzunehmen. Dieser Stickstoff konnte nur aus der Luft stammen, eine Annahme, die dann zuerst durch Schlössing Sohn und Laurent auf gasanalytischem Wege bewiesen wurde.

Die Unabhängigkeit der Leguminosen vom Stickstoffgehalt des Bodens läßt sich leicht durch vergleichende Düngungsversuche nachweisen. Sät man in zwei Versuchsreihen auf je drei Kulturgefäße etwa Erbsen und Hafer (Wager) und präpariert den Boden derart, daß Gefäß I ungedüngt, Gefäß II mit Aschenbestandteilen gedüngt, Gefäß III mit Aschenbestandteilen und Stickstoff gedüngt ist, so gedeihen Getreide auf I und II fast gleich schlecht, auf III gut; Erbsen nur auf I schlecht, auf II und III gleich gut, fast ohne Unterschied.

Die Isolierung der wirksamen Bakterien auf künstlichem Nährboden gelang zuerst Beijerink (1888), der ein Dekokt von Papilionaceenblättern, dem außer Gelatine Asparagin und Rohrzucker zugegeben wurde, verwandte.

„Bacterium radicicola Beijerink" besitzt in der Reinkultur zweierlei Zellen, 1 μ ($^1/_{1000}$ mm) breite und 4 bis 5 μ lange „Stäbchen" und viel kleinere, 0,18 μ breite und 0,9 μ lange „Schwärmer". Die Bakterien sind beweglich, aerob und sterben, da sie keine Sporen bilden, schon bei einer Temperatur von 60 bis 70° ab.

Die verschiedenen Papilionaceengattungen beherbergen etwas verschiedene Formen von solchen Bakterien, die auch physiologisch verschieden sich wenigstens nicht ohne weiteres

auf andere als ihre Wirtspflanzen übertragen lassen. Ueber die Frage ihrer Zugehörigkeit zu einer oder mehreren Arten besteht noch große Meinungsverschiedenheit. Beijerink nimmt die Artverschiedenheit wenigstens einiger Formen an; andere, unter ihnen Hiltner, halten die Bakterien für durch Anpassungen an verschiedene Pflanzengattungen und -arten entstandene Rassen einer einzigen Art. Für diese Auffassung spricht, daß es Hiltner gelang, die im allgemeinen nicht für Bohnen brauchbaren Erbsenbakterien jenen physiologisch anzupassen. Indessen ist die Frage damit noch nicht entschieden. Hiltner selbst tritt neuerdings für die Trennung der Knöllchenbakterien in 2 Arten ein (Rhizobium radicicola und Rhizobium Beijerinki H. et St.), deren jede eine Reihe von Rassen umfassen soll.

Mit der Reinkultur der Bakterien war die Möglichkeit der Synthese der Leguminosensymbiose gegeben. Sie läßt sich ohne Schwierigkeiten ausführen, wenn man einen Aufguß einer Bakterienreinkultur auf das Kulturgefäß einer in sterilisiertem, stickstofffreiem, mit anorganischen Nährsalzen versehenen Sande kultivierten Pflanze aufgibt (Fig. 3).



a b

Fig. 3. Phaseolus vulgaris auf Sand mit Mineralsalzen ohne Stickstoff kultiviert. 1 ungeimpft, 2 mit Bohnenbakterien geimpft. Nach Hiltner.

Je nach Art und Herkunft der Bakterien kann dabei das Resultat verschieden ausfallen und entspricht dabei dem Virulenzgrad der verwandten Bakterien. Die Möglichkeiten sind dabei nach Nobbe und Hiltner folgende:

1. Die Bakterien vermögen nicht in die Wurzel einzudringen.

2. Die Bakterien dringen in die Wurzel ein, werden aber sofort resorbiert. Die entstandenen Anschwellungen der Wurzel verschwinden später wieder.

3. Die Bakterien erzeugen normale Knöllchen, werden aber dann resorbiert. Die Knöllchen bleiben unwirksam.

4. Die eingedrungenen Bakterien erzeugen wirksame stickstoffsammelnde Knöllchen; der Grad der Stickstoffsammlung entspricht dem der Virulenz der Bakterien. Durch eine nachträgliche Bodenimpfung mit höher virulenten Bakterien, als sie schon vorhanden, kann der Stickstoffgewinn erhöht werden.

5. Die Virulenz der Bakterien ist so groß, daß die Pflanzen gegenüber den mit normal virulenten Bakterien versehenen eine Schädigung erfahren.

6. Die Bakterien verhalten sich der Pflanze gegenüber, besonders wenn diese schlecht ernährt oder durch ungünstige Einflüsse geschädigt ist, als echte Parasiten. Sie verwandeln sich im Knöllchen nicht in Bakteroiden, sondern leben auf Kosten der Pflanze. Eine Stickstoffsammlung findet dann nicht statt.

Die Einwanderung der Bakterien in die Wurzel bietet somit durchaus das Bild einer pathogenen Infektion. Die Pflanze wehrt sich zunächst gegen die Infektion. Erst nach Umwandlung der Bakterien zu Bakteroiden tritt das symbiotische Gleichgewicht ein und die Stickstoffsammlung beginnt. Dafür ernähren sich die Bakterien von den dem Pflanzengewebe entnommenen Kohlenhydraten. Die Aehnlichkeit der Infektionsform der symbiotischen Leguminosenbakterien mit gewissen Vorgängen der Pathologie wird noch erhöht durch die von Hiltner festgestellte Tatsache, daß eine einmal infizierte Pflanze Immunität besitzt gegen Bakterien niedrigeren Virulenzgrades als sie bereits besitzt. Nur Bakterien höherer Virulenz vermögen noch in die Pflanze einzudringen.

2. Die Wurzelknöllchen der Erle und anderer Gewächse. Außer bei den Leguminosen trifft man bei einer Reihe von anderen Gewächsen Wurzelknöllchen an. So führen Erlenarten (Alnus), Gagel (Myrica gale), Oelweide (Elaeagnus) und Sanddorn (Hippophae) an den Wurzeln perennierende Knöll-



Fig. 4. Wurzelknöllchen der Erle. $^1/_3$ natürlicher Größe.

chen, die im Laufe der Jahre zu mehreren Zentimeter dicken, aus starkverzweigten Kurzwurzeln bestehenden Knöllchennestern werden (Fig. 4). Unter dem Namen Schinzia alni waren diese Bildungen schon lange bekannt. Genauere Untersuchungen liegen bei Alnus glutinosa und Myrica gale vor.

Die Wurzeln der Erle (Alnus glutinosa) werden von außen auf dem Wege der Wurzelhaare durch fadenförmige Bakterien infiziert, die sich inter- und intrazellulär ausbreiten und die Bildung von Anschwellungen auslösen, die zunächst zu einfachen, später zu zusammengesetzten Knöllchen heranwachsen.

Die Zellen junger Knöllchen finden sich im Herbst angefüllt mit geknäuelten Fadenmassen, an denen Fadenenden zu „Bläschen" anschwellen können. Außer diesen finden sich noch chlamydosporenähnliche Gebilde darin. In den Interzellularräumen wird eine sehr dichte, einem pseudoparenchymatischen Geflecht ähnelnde Masse wahrgenommen, in der durch Kontraktion des Bakterienplasmas sporenähnliche Körper (Arthrosporen) gebildet werden, die in Reihen hintereinander zu liegen pflegen. Im Mai des folgenden Jahres, wenn der Baum die Blätter entfaltet, findet sich die Bakterienmasse sehr vermindert und auf wenige Fadennester reduziert. Aus den Arthrosporen sind relativ große, hefezellförmige Gebilde entstanden, die Bakteroiden darstellen sollen. Aus der bei ihrer Entstehung von der Pflanze resorbierten extrabakteroiden Fadenmasse resultiert der Stickstoffgewinn der Pflanze (Peclo).

Nach Shibata verläuft die Sache etwas anders. Aus den sich von den Tragfäden ablösenden Bläschen werden größere rundliche, vielfach zerteilte Körper, die in einer protoplasmatischen Wabenstruktur liegend von der Pflanze durch proteolytische Enzyme resorbiert werden (Fig. 5).

Die Isolierung der Bakterienorganismen der Knöllchen von Alnus glutinosa und Myrica gale ist Peclo 1910 gelungen in einer Nährlösung, die sich für den Organismus als spezifisch erwies (Bierwürze, der relativ große Mengen Kaliumsalze [KH_2PO_4 und K_2CO_3] zugesetzt sind). Er wächst in Form einer Zoogloea aus homogenen, manchmal verzweigten Fäden, die in stäbchenförmige oder runde Zellen (Oidien und Microoidien) zerfallen können und bildet in Kultur die aus den Zellen der Pflanze bekannten Bläschen, deren verschleimende Membranen dichte granulierte Massen auf der Oberfläche der Flüssigkeit entstehen lassen. Außerdem werden verschiedene Formen von Endosporen gebildet.

Die Synthese zwischen Pflanze und Bakterien gelang Peclo bei knöllchenfreien Erlenpflänzchen, die auf mit Nährlösung befeuchtetem Sande kultiviert wurden. Durch Aufbringen von der Reinkultur entstammenden Bakterien konnte er an den Wurzeln der Pflänzchen normal funktionierende Knöllchen erzeugen. Im System gehören die Bakterienorganismen der Erle nach Peclo zu den Streptotricheen und insbesondere zur Gattung Actinomyces.

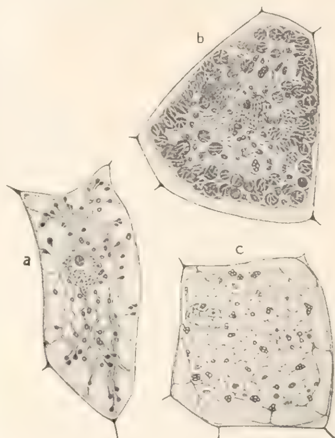


Fig. 5. Alnus incana v. glauca. a Infizierte Zelle mit beginnender Bläschenbildung, b eine solche Zelle in späterem Stadium, Bläschen zu kugeligen Körpern geworden, 3 Bläschen resorbiert, es bleibt ein protoplasmatisches Wabennetz mit „Sekretkörperchen" unbekannter Bedeutung. Nach Shibata.

Peclo hat die beiden von ihm isolierten Formen nach den Wirtspflanzen mit Actinomyces alni und A. myricae bezeichnet, hält sie für nahe verwandt mit dem Erreger der Tuberkulose und zeigt, daß dieser sich in gleichen Nährlösungen sehr ähnlich entwickelt. (Schon Shibata hat diese Verwandtschaft vermutet.)

Die Bedeutung der Erlenactinomycose für die Pflanze liegt wie bei der Bakteriensymbiose der Leguminosen in der Verwertung des Luftstickstoffs durch die Pflanze, den die Bakteriensymbionten assimilieren. Hiltner hat den Nachweis für die Erle erbracht, indem er junge Erlenpflanzen mehrere Jahre in stickstofffreier Nährlösung kultivierte. So hatten 4 bis 5jährige knöllchentragende Erlen unter den genannten Bedingungen eine Höhe von $1^1/_2$ m erreicht, während knöllchenfreie unter gleichen Umständen nicht über 5 cm hoch wurden (Fig. 6). Dieser Versuch war nur möglich, weil die Erlenknöllchen im Gegensatz zu

denen der Leguminosen auch unter Wasser zu arbeiten vermögen.

Bei Ernährung mit gebundenem Stickstoff werden die Erlenknöllchen von der Pflanze resorbiert, die Bindung freien Stickstoffes hört auf.

Fig. 6. Alnus glutinosa in stickstofffreier Nährlösung. Randpflanzen mit Knöllchen, die mittlere knöllchenfrei. Nach Hiltner.

Aehnlich wie die Erle verhält sich auch Elaeagnus angustifolia (Nobbe und Hiltner).

Außer bei Alnus, Myrica, Eleagnus und Hippophae sind noch bei wenigen Pflanzen Knöllchen bekannt geworden, so bei Melampyrum und Rhinanthus (Beijerink) sowie bei verschiedenen Scrofulariaceen und Labiaten (Hiltner), über deren Bedeutung und Funktion nichts Näheres bekannt ist.

3. Bakterienknoten auf Laubblättern von Rubiaceen und Myrsinaceen. Den vorher beschriebenen Wurzelsymbiosen lassen sich einige Fälle von Symbiosen anderer Pflanzenteile mit Bakterien gegenüberstellen. Eine Art von Bakteriengallen auf Blättern tropischer Rubiaceen wurde von Zimmermann (1902) beschrieben. Miehe untersuchte (1911) ähnliche Bildungen auf den Blättern javanischer Ardisiaarten (Myrsinaceen) und berichtet ausführlich über ihre Erzeuger und deren Entwickelung in der Pflanze.

An dem Vegetationspunkt der Ardisia finden sich die Hohlräume zwischen den Blattanlagen mit bakterienhaltigem Schleim gefüllt. Bei der Entwickelung wandern die Bakterien durch Wasserspalten in das Innere der jungen Blätter, wo sie, sich von Ausscheidungen der Pflanze in die Interzellularen ernährend, zu Kolonien entwickeln, die äußerlich regelmäßig am Blattrande orientierte, knotige Verdickungen erzeugen. Die Bakterien schädigen die Pflanze nicht. Sie gelangen auch in die Vegetationspunkte der Blüten und finden sich in den Höhlungen der Fruchtblattanlagen, von denen sie in einer noch unaufgeklärten Weise zwischen Embryo und Endosperm des Samens gelangen, der bei der Keimung wieder eine infizierte Pflanze liefert.

Die Bakterien konnte Miehe nicht in Reinkultur erhalten. Sie stellen unbewegliche, dünne, ziemlich lange und häufig gebogene Stäbchen ohne Sporenbildung dar. In den Knoten finden sich auch dickere, zuweilen verzweigte Formen. Von der untersuchten Ardisia crispa konnte Miehe keine bakterienfreien Exemplare finden. Wie sie sind auch die anderen im paläotropischen Gebiet vorkommenden Ardisiaarten mit Bakterienknoten versehen, während diese den afrikanischen und amerikanischen Arten der Gattung fehlen.

C. F. von Faber ist 1912 die Kultur von symbiotischen Rubiaceenbakterien gelungen. Sie zeigen, wie die der Erlen, Verwandtschaft mit dem Tuberkelbazillus. Von Faber konnte auch die bakterienhaltigen Samen der Pavetta Zimmermanniana Val. durch Hineinlegen in heißes Wasser von 50° direkt sterilisieren und erhielt aus ihnen bakterienfreie Pflänzchen. Vergleichende Kulturversuche und chemische Analysen der bakterienfreien und bakterienhaltigen Pflanzen bestätigten die Vermutung, daß die Bakterien der Pflanze durch die Assimilation von Stickstoff aus der Atmosphäre wesentliche Dienste leisten. Pflanzen mit Bakterien gediehen auf stickstofffreiem Sande, Pflanzen ohne solche litten Stickstoffhunger und blieben im Wachstum zurück. Die Blattknoten der Rubiaceen und wahrscheinlich auch der Myrsinaceen sind also als den Wurzelknöllchen der Legumi-

nosen und Erlen usw. analoge Bildungen aufzufassen.

B. Pflanzen und Fadenpilze (Mycorrhizen).

1. Allgemeines und Geschichte. Der Ausdruck Mycorrhiza (auch Mycorhiza geschrieben) — Pilzwurzeln — stammt von B. Frank, der damit alle Formen von Vereinigung von Wurzeln und Fadenpilzen umfaßte. Während schon vor Frank einige Fälle von Wurzelverpilzung bekannt waren (Hartig [1851], Gasparrini [1856], Boudier [1876], Kamienski [1881]), war es doch diesem vorbehalten, das häufige Vorkommen der Erscheinung aufzudecken und erweitertes Studium einzuleiten. Ektotrophe M. nannte Frank die schon von Hartig beschriebene Form, die er bei unseren Waldbäumen auffand, bei der die die verkürzte Wurzel umgebenden Pilzhyphen nur interzellulare Abzweigungen zwischen die Zellen der Wurzelepidermis entsandten. Endotrophe M. nannte er die Formen, bei denen die Pilzhyphen intrazellular in den Zellen der Wurzelrinde lebten.

Außer Frank (1885, 1887, 1892) selbst stellten Schlicht (1889), Janse (1896) und vor allem Stahl (1900) die wider Erwarten große Verbreitung des Phänomens sowohl in der gemäßigten Zone wie in den Tropen fest.

Nach Stahl entbehren nur wenige Familien in allen Vertretern der M. (Cruciferen, Cyperaceen, Polypodiaceen, Equisetaceen). Die Holzgewächse unserer Wälder sind fast alle verpilzt. Ebenso überwiegt die Zahl der M.-Pflanzen auf trockenen, unkultivierten Oertlichkeiten jeder Formation in Mitteldeutschland, den Alpenländern und an den Küsten des Mittelmeeres. Auf feuchtem und kultiviertem Boden allein ist die M. wenig verbreitet. Ausnahmen bilden die an Nährsalzen und Stickstoff armen Hochmoorformationen.

Zugleich mit der Sammlung anatomischer Einzelheiten und der Feststellung der Verbreitung ging man auch dazu über, die Bedeutung der Sache zu mutmaßen. Als Ersatz der Wurzelhaare deutete die M. schon Pfeffer (1877). Frank (1885, 1887) sah die Funktion ekto- und endotropher Verpilzung außer in der wasser- und nährsalzabsorbierenden in der Lösung und Nutzbarmachung organischer Stoffe des Bodens, insbesondere der Humusstoffe. Später (1891) modifizierte er seine Ansicht für die endophytischen M. dahin, daß die mit ihnen versehenen Pflanzen — ähnlich wie die Insektivoren dies mit Insekten tun — Pilze in ihre Zellen hineinlocken, die verdaut ihren Stickstoffgehalt an die Pflanze abgeben.

Janse (1896), der tropische Pflanzen mit endotropher Verpilzung in Java untersuchte, glaubt an die stickstoffassimilierende Funktion der Pilze, Magnus (1900), Gallaud (pr. p. 1905) und Bernard (1904, 1909) denken bei der endotrophen Mycorrhiza an eine Umwandlungstätigkeit des Pilzes an Stoffen, die die Pflanze selbständig aufnimmt, oder erzeugt.

Einige wenige Botaniker sprachen der M., besonders der ektotrophen, überhaupt keine Funktion zu und betrachteten die Pilze als relativ unschädliche Commensualen. Der ursprünglich von Pfeffer stammende Gedanke des Ersatzes der Wurzelhaare oder ihrer absorbierenden Funktion durch den Pilz ist später von Stahl in neuer Form wieder ausgesprochen und durch eine geniale, auf vergleichend biologischer Beobachtung beruhende Begründung auf weitausgreifende Grundlage gestellt worden.

Stahl findet einen Zusammenhang zwischen Wurzelverpilzung und Transpiration, derart, daß die Pilze der Pflanze einen Ersatz für die zu spärliche Transpiration und die dadurch verminderte Aufnahmefähigkeit für die Nährsalze zu bieten vermögen. Alle Merkmale geringer Wasserdurchströmung, wie reduzierte Gefäßbündel, Fehlen der Ausscheidung flüssigen Wassers, Speicherung von Zucker statt der Stärke in den Blättern, geringes Aschengewicht, insbesondere spärliches Vorhandensein des unbrauchbaren oxalsauren Kalks in der Pflanze sind echten M.-Pflanzen eigen, während Pflanzen regelmäßiger Wasserdurchströmung sich unverpilzt zeigen. Diesen Verhältnissen entspricht auch die Verbreitung der M.-Pflanzen, die an Orten erschwerten Nährsalzerwerbes, so in steinigen, wasserarmen Oertlichkeiten und im Humus der Wälder, wo der Kampf um die Nährsalze von tausend Organismen ausgefochten wird, vorkommen, während Nichtmycorrhizenpflanzen auf feuchten und in Kultur genommenen Böden zu finden sind. An sehr zahlreichen Beispielen hat Stahl seine Hypothese erläutert, die mit ihrer genauen Fragestellung zahlreiche weitere Untersuchungen veranlaßt hat.

Das von den eben erwähnten umfassenden Hypothesen bestimmte Gebiet hat sich in neuester Zeit in eine Anzahl von Teilprobleme zerspalten, deren Untersuchung die eine oder die andere Ansicht ausgeschlossen hat. Es zeigt sich, daß die Beurteilung der M. nach einem einzigen Gesichtspunkt unmöglich ist, da die einzelnen M.-Formen keine physiologisch analogen Dinge sind. Die einzige Hypothese, deren allgemeine Möglichkeit noch besteht, ist die Stahlsche, schließt doch die Annahme der

Nährsalzvermittlung andere Funktionen, wie etwa den Erwerb organischer Stoffe aus dem Boden oder die Assimilation des atmosphärischen Stickstoffs nicht aus.

Neue Resultate sind durch glückliche Versuche der Isolierung und Reinkultur mancher Pilzsymbionten und die dadurch mögliche Synthese einzelner Symbiosen erreicht worden.

Das ursprünglich homogene Gebiet zerfällt daher heute in eine Reihe von Abschnitten, die zum großen Teil noch sehr unvollkommen untersucht sind.

2. **Endotrophe Mycorrhiza.** 2a) Pilzmycel mit regelmäßiger Querwandbildung. Resorption von Hyphenknäueln. Entstehung von Klumpen: Orchideen. Verglichen mit der Bakteriensymbiose der Leguminosen bedeutet die M. der Orchideen für die Pflanzen noch mehr. Wir treffen unter den Orchideen eine größere Anzahl nicht oder schwach chlorophyllhaltiger Pflanzen an, die die bei grünen Pflanzen übliche, durch Photosynthese von Kohlendioxyd und Wasser vor sich gehende Ernährungsform ganz oder teilweise aufgegeben und Fadenpilzen überlassen haben, die ihnen vorgebildete organische Nahrung aus dem Boden vermitteln. Das bekannteste Beispiel, die Nestwurz (Neottia nidus avis. Fig. 7) entwickelt sich unter der Bodenoberfläche unabhängig von Licht aus dem Samen zur blühbaren Pflanze, deren bleicher und laubblattloser Blütensproß allein das Tageslicht erblickt. Zum Unterschied von den autotrophen Gewächsen bezeichnen wir diese als heterotrophe und nennen sie (im Gegensatz zu den pflanzlichen Parasiten) Saprophyten. Hierzu kommt aber noch, daß auch die grünen Orchideen, selbst wenn sie im erwachsenen Stadium ohne Pilze zu leben vermögen, sich doch als keimende Samen als ebensolche heterotrophe Gewächse verhalten und nicht imstande sind, sich ohne Hilfe des Pilzes zu entwickeln. Mithin erscheint die Existenz der ganzen Familie (wenige relativ primitive Formen vielleicht ausgenommen) an die der Pilze gebunden, was sich in mannigfachen, zwischen beiden Organismen eingetretenen Korrelationen äußert.

Der wirksame Pilzapparat der erwachsenen Pflanze sitzt meist in den Wurzeln, (Fig. 8) seltener in Achsenorganen, und zwar immer in den Rindenschichten. Die Gefäßbündel und die Vegetationspunkte bleiben stets pilzfrei. Die Einwanderung des im Boden vorhandenen Pilzes erfolgt durch die absorbierenden Organe (Wurzelhaare oder Durchlaßzellen). Die weitere Entwickelung ist bei den europäischen Erdorchideen etwa folgende: Der Pilz breitet sich in den Zellen der Wurzelrinde aus und erfüllt sie mit dichten Knäueln verschlungener Hyphen. Dabei werden die Zellen nicht in ihren Lebensfunktionen gestört, nur die



Fig. 7. Neottia nidus avis. Vogelnestorchis.

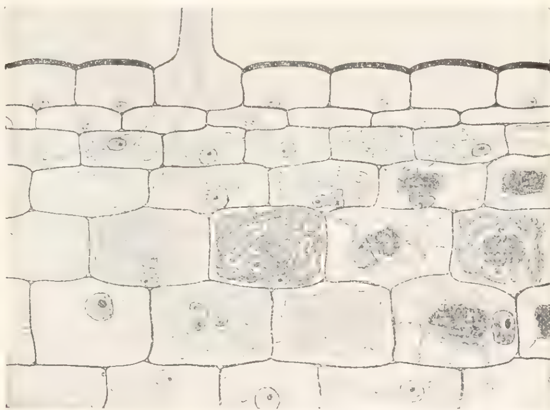


Fig. 8. Platanthera chlorantha. Längsschnitt durch die Wurzelrinde. Halbschematisch.

in ihnen lagernde Stärke wird vom Pilz verwertet. Nun verläuft die Sache in den äußeren Rindenschichten, den „Pilzwirtzellen", meist anders als in den inneren, den „Verdauungszellen". Dort bleibt der Knäuelzustand des Pilzes dauernd erhalten, hier kollabiert unter weitgehenden Form- und Größeveränderungen der Zellkerne der Pflanze die ganze mit Reservestoffen vollgepfropfte Pilzmasse, ballt sich zusammen und erzeugt pro Zelle je einen kompakten Klumpen gelblicher Farbe, der in der Zelle suspendiert bleibt. Der Klumpen stellt die unverdaulichen Reste des Pilzmycels dar, dessen brauchbare Inhaltsbestandteile von der Pflanze verwertet werden.

Solche klumpenführende Zellen sind schon aus der Steinkohle bekannt und bezeugen das hohe Alter der Mycorrhiza (F. E. Weiß).

Das Mycel der peripheren Pilzwirtzellen entsendet in zentrifugaler Richtung Hyphen durch die Wurzelhaare in den Boden, die sich hier verzweigend ein mehr oder weniger dichtes Hyphennetz erzeugen, dessen Mittelpunkt die Wurzel bildet. An diesen Hyphen finden sich zuweilen die Reproduktionsorgane des Pilzes in Form kettenförmig aneinanderhängender Conidien.

Die Pflanze erhält bei der Verdauung des Pilzmycels ohne Zweifel organische Stoffe der Kohlenstoff- und Stickstoffgruppe. Doch erscheint der Verdauungsprozeß zur Ernährung besonders der Holosaprophyten nicht auszureichen, weshalb eine direkte Diffusion von gelösten mineralischen und organischen Bodenstoffen wahrscheinlich ist. Ein großer Teil der Pilzwirkung beruht jedenfalls auf der enzymatischen Lösung der Bodensubstanzen, da sonst nicht begreiflich wäre, daß bei manchen Verpilzungsformen (Neottia) der einmal in den keimenden Samen eingewanderte Pilz dauernd in der Pflanze eingeschlossen bleibt und keine regelmäßigen Verbindungen mit dem Bodenmycel besitzt.

Fast ebenso, wie die Infektion der Wurzel, erfolgt die des gequollenen Orchideensamens (Fig. 9). Dieser entbehrt aller Differenzierungen, so des Nährgewebes, des Cotyledo und der Vegetationspunkte von Sproß und Wurzel. In einer lockeren Hülle liegend besteht er aus wenigen hundert Zellen, die einen sphärisch ovalen Körper von 1 bis 2 Zehntel Millimeter Durchmesser bilden. Zwei Pole lassen sich an ihm unterscheiden, an dem einen befindet sich zuweilen ein wenigzelliger Fortsatz, der Suspensor, der dem unreifen Samen in der Samenanlage als absorbierendes Organ diente. Der trockene Same enthält fettes Oel und Eiweißstoffe; ersteres wird bei Beginn der Keimung zum Teil in Stärke verwandelt. Der erste Keimungsprozeß, die Quellung, erfolgt, wenn der Same in feuchte Umgebung kommt. Bei den terrestrischen Orchideen bleibt es dabei, wenn nicht Infektion erfolgt, bei den Epiphyten kann sich bei gewissen Gattungen ein mehr oder weniger entwickeltes Pflänzchen ausbilden, das jedoch ohne Eintritt der Infektion in wenig fortgeschrittenem Stadium zugrunde geht.



Fig. 9. Die Entwickelung des Odontoglossumsamens nach Noël Bernard. 1 Embryo im Längsschnitt, trocken, 2 gequollen, 3 infiziert mit Haarpapille, Spaltöffnung und Scheitelmeristem, 4, 5, 6 junge Pflänzchen, 7, 8, 9 durchschnitten, die dunkleren Partien sind infiziert.

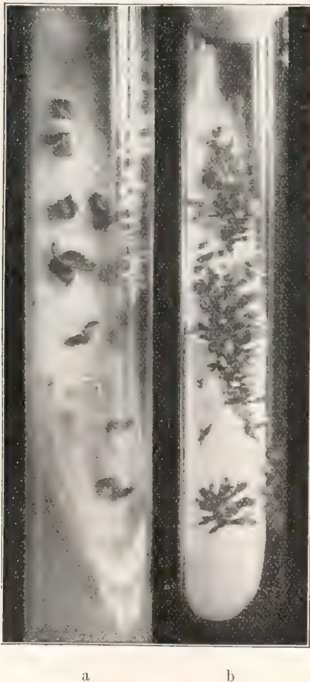
Ist der Pilz in der Umgebung des gequollenen Samens vorhanden, so dringt er, chemotropisch angelockt, durch die an Eiweiß reichen „Einlaßzellen" am Suspensorpol ein und breitet sich in den unteren Zellen des Keimlings aus. Hier entsteht nun ein verpilztes Gewebe, darin die Vorgänge im wesentlichen denen in der Wurzel der Pflanze gleichen. Die Wirkung der Infektion auf die Keimung des Samens äußert sich in rapidem Wachstum, die zur Entstehung des „Kreiselstadiums" führt, eines farblosen oder grünen Pflänzchens, das außer einem mit Blattanlagen versehenen Vegetationspunkt auf der oberen Fläche seitlich und unten Papillen mit absorbierenden Haaren besitzt und an dem nach einer bei verschiedenen Gattungen von wenigen Wochen bis zu mehreren Jahren variabelen Zeitdauer die ersten Blätter und Wurzeln entstehen. Diese ersten Wurzeln werden

infiziert und die junge Pflanze ist damit der erwachsenen in Beziehung auf ihre Verpilzung gleichwertig.

Noël Bernard ist es im Jahre 1903 zuerst gelungen, Analyse und Synthese der Orchideenpilzsymbiose in Reinkultur durchzuführen. Er isolierte eine Reihe von Pilzen aus Orchideenwurzeln auf künstlichem Nährboden und brachte in die Kulturen aseptisch geerntete Samen. So erhielt er zunächst die Keimung einer Laelia mit einem aus Spiranthes aestivalis isolierten Pilze.

In der Folge führten Bernard und Burgeff eine große Anzahl weitere Isolierungen und Synthesen (Fig. 10) aus, so daß heute ein Ueberblick der wichtigsten Pilzformen europäischer und exotischer Orchideen gegeben werden kann.

Die Orchideenpilze bilden auf künstlichen Nährböden mannigfaltiger Art ein lockeres Mycel, dessen Hyphen in Lang- und Kurzhyphen differenziert sind. Statt letzterer können perlschnurförmige, verzweigte Conidienketten gebildet werden (Fig. 11), deren Einzelglieder jedoch nicht



a b

Fig. 10. Keimende Pflänzchen epiphytischer Orchideen mit den zugehörigen Pilzen auf Stärkenährsalzlager in Reinkultur. a Vanda-, b Oncidiumhybriden.

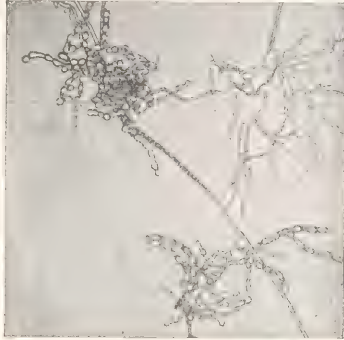


Fig. 11. Mikrophotographie eines Orchideenpilzes: Mycelium radicis (Habenaria) psychodis.

leicht auseinanderfallen. Aus vielen solchen anastomosierenden Conidien können sich mehrere Millimeter dicke Sklerotien entwickeln.

Die Pilze sind hochgradig sauerstoffbedürftig, säureempfindlich und kommen mit Ammoniumsalzen als Stickstoffquelle aus, gedeihen aber nicht auf stickstofffreiem Substrat. Sie können sehr verschiedene Kohlenhydrate verwerten, die sie durch diastatische, invertierende und glykosidspaltende Enzyme in Lösung bringen.

Bernard hat unter den sogenannten Fungi imperfecti nahe Verwandte der Orchideenpilze in der auf Kartoffeln parasitierenden Rhizoctonia solani Kühn aufgefunden.

Er hat auch versucht, die ihm bekannten Orchideenpilze unter drei Artdiagnosen zu bringen (Rh. repens, Rh. lanuginosa; Rh. mucoroides). Burgeff hat auf die Aufstellung von Arten verzichtet und die einzelnen Isolierungen nach den Wirtspflanzen bezeichnet. Nach neuesten Untersuchungen (Burgeff) finden sich bei unseren am meisten kultivierten Gattungen von Treibhausorchideen 6 physiologisch verschiedene Pilzgruppen, die sich teilweise auch als morphologisch zusammengehörig erweisen. Jeder aktive Pilz einer Pilzgruppe kann dabei alle zur Pflanzengruppe gehörigen Gattungen zur Keimung bringen. In manchen Fällen gelingt auch die Synthese nicht zusammengehöriger Formen, doch ist die Keimung der Samen eine langsame und unregelmäßige.

Bei einheimischen Erdorchideen ist trotz

zahlreicher Versuche die Synthese von Samen und Pilz noch nicht gelungen, wenn sich auch im Freien in der unmittelbaren Nähe der Mutterpflanzen zuweilen zahlreiche Keimpflanzen finden lassen.

Ein aus einer Orchidee isolierter Pilz braucht nicht notwendig die Samen der Wirtspflanze zur Keimung zu bringen. In vielen Fällen ist seine Wirkung gleich Null. Er kann auch unmittelbar nach der Isolierung wirksam sein und nach kürzerer oder längerer Kultur auf künstlichem Nährboden seine „Aktivität" verlieren. Diese eingetretene Degeneration äußert sich darin, daß der Pilz nach seinem Eindringen in den Samen diesen trotz starker Gegenwehr der Pflanze rascher oder langsamer durchwächst und abtötet, so daß sich das symbiotische Gleichgewicht zwischen beiden Organismen nicht einstellen kann. Da wir uns die symbiotischen Pilze aus echten Parasiten hervorgegangen denken, bestände die Degeneration in einem Anwachsen der parasitären Eigenschaften gegenüber den symbiotischen Korrelationen. Der Grad der parasitären Eigenschaft ist aber die „Virulenz" der Pathologie (vgl. die Leguminosenbakterien, bei denen eine rein pathologische Deutung der Verhältnisse möglich war). Nehmen wir nun das Nebeneinander von parasitären und symbiotischen Eigenschaften beim Pilze an, so lassen sich die bei der wichtigsten Synthese möglichen Fälle unter folgende Bezeichnungen bringen.

I. Inaktive Pilze von geringer Virulenz.

Die Samen werden nicht infiziert und entwickeln sich nicht oder nur soweit, als sie es ohne Pilz tun würden.

II. Wenig aktive Pilze von geringer Virulenz.

Nur wenige Embryonen werden infiziert. Sie entwickeln sich sehr langsam, die übrigen verhalten sich wie bei I.

III. Aktive Pilze. Alle Embryonen werden infiziert.

a) Geringe Virulenz.

Langsame und sehr gleichmäßige Entwickelung der Samen.

b) Mittlere Virulenz.

Rasche aber unregelmäßige Entwickelung der Samen.

c) Hohe Virulenz.

Zunächst rapide Keimung der Samen. Stationärwerden und spätere Abtötung der Pflänzchen, deren Zellen nach allen Richtungen vom Pilze durchwachsen werden.

IV. Wenig aktive Pilze von hoher Virulenz.

Keine Entwickelung, da Embryonen sofort nach der Aussaat vom Pilz vernichtet werden.

Die Virulenz ist in engen Grenzen beeinflußbar durch die Art des Nährbodens, so kann Fall IIIc durch Verwendung eines an organischen Stoffen armen Nährbodens in IIIb, IIIa auf einem an solchen reichen Boden in IIIb verwandelt werden.

Das Verhältnis von Pflanze und Pilz stellt analytisch betrachtet sich also als Antagonismus dar, der durch beiderseitige Korrelationen in bestimmten Bahnen verläuft, und die Entstehung einer neuen organischen Einheit im Gefolge hat. Aeußere abnorme Einflüsse (wie die Kultur des Pilzes auf künstlichem Nährboden) vermögen in diesen Korrelationen Aenderungen hervorzurufen, die das Resultat gefährden können.

Bei biologisch - teleologischer Betrachtungsweise erscheint das Verhältnis beider Organismen als mutualistische Symbiose, insofern jeder der Symbionten dem anderen die Existenz garantiert. So vermag der Pilz mit der Pflanze beispielsweise auf einem von löslichen organischen Stoffen freien Boden (reinem Agar mit mineralischer Nährlösung) in Verbindung mit der grünen Keimpflanze zu gedeihen (Burgeff), der er die Assimilate entnimmt; die farblose Keimpflanze mit Hilfe des Pilzes sich von organischen Stoffen zu ernähren, wie sie im Waldeshumus zur Verfügung stehen.

Noch einleuchtender wird die Berechtigung von Symbiose zu reden beim Vergleich des durch sie entstandenen Doppelorganismus und seiner Fähigkeiten mit anderen Pflanzen.

Ueber die Bedeutung der Verpilzung der erwachsenen Orchideen ist bereits viel geschrieben worden. Außer der bereits erwähnten, durch die Sistierung der CO_2-Assimilation mancher Arten bewiesene Assimilation organischer Nahrung (Fig. 12) hat man über die Art dieser Assimilation und auch über Möglichkeiten anderer Art manches vermutet. So vertritt Janse die Annahme der Assimilation freien Stickstoffs durch den Pilz; Magnus die der Umwandlung für die Orchidee ungeeigneter Bodenstoffe; Stahl die des Erwerbs der Nährsalze; Weyland die Abgabe im Pilzstoffwechsel entstandener Stickstoffverbindungen, so des Harnstoffs an die Pflanze.

Die Assimilation atmosphärischen Stickstoffs durch den Pilz ist wenig wahrscheinlich, da weder der Pilz, noch die verpilzte Keimpflanze auf stickstofffreiem Boden gedeihen (Burgeff). Die Umwandlungshypothese ist möglich und erklärt, wenn man unter Umwandlung auch die Löslichmachung von Bodenstoffen verstehen will, sogar sehr viel.

Die Stahlsche Nährsalzhypothese, die alle M.-Pflanzen umfaßt, findet in der Art des Baues und der Wasseraufnahme der Orchideen gute Stützen, indem zahlreiche Momente für eine relativ geringe Wasserdurchströmung der Orchideen im Verhältnis zu anderen Pflanzen sprechen, die einen anderen, durch den Pilz vermittelten Weg der Nährsalzaufnahme vermuten lassen. Ein physiologischer Nachweis ist noch nicht gelungen, doch steht dieser Auffassung die Kohlenstoff- und Stickstoffheterotrophie der Orchideen in keiner Weise im Wege.

Ist die Art der Funktion des Pilzes auch noch unsicher, so ist seine allgemeine Bedeutung doch eine absolute. Die Entstehung einer Symbiose, bei der eine Gruppe

höherer Pflanzen an einen niederen Organismus derart gebunden erscheint, daß ihre Existenz ohne ihn direkt unmöglich wird,

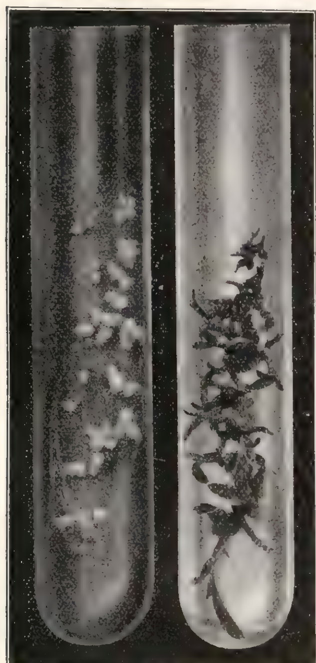


Fig. 12. Sämlinge von Cymbidium mit dem entsprechenden Wurzelpilz auf Rohrzuckernährsalzagar in Reinkultur. 8 Monate alt. a seit Monaten am Licht mit Blättern und Wurzeln; b ganz im Dunkeln gewachsen in Form kurzer gedrungener holosaprophytischer verzweigter Keimachsen mit absorbierenden Haaren und kleinen Schuppenblättern an den Vegetationspunkten.

läßt sich nur verstehen, wenn wir im Vergleich mit systematisch nahestehenden selbständigen Pflanzengruppen Aequivalente finden können, die die Orchideen mit der Pilzabhängigkeit erwarben. Liegt die Bindung auf dem Gebiet der Fortpflanzung, so liegt der Vorteil auf dem der Verbreitung.

Durch den Ammendienst des Pilzes, der ein besonderes Nährgewebe im Samen überflüssig machte, war die Ausbildung sehr kleiner und leichter, fast sporenähnlicher Samen möglich, die zu vielen Hunderttausenden in einer einzigen Frucht entstehen konnten. Dieser Samentypus ermöglichte in Verbindung mit besonderen, das Abtragen der Samenmasse durch den Wind erleichternden Anpassungen eine Windverbreitung, wie wir eine solche eigentlich nur von den Sporen der Cryptogamen kennen, und ließ die Verbreitung der Orchideen über die ganze Erde wohl erst zu. Insbesondere die Epiphyten verdanken der enormen Flugfähigkeit ihrer Samen und damit zuletzt dem Wurzelpilz ihre Ansiedelungskraft in den tropischen Wäldern.

Bei einigen wenigen Orchideen sind Pilze anderer Art als die beschriebenen bekannt geworden. So beherbergen die saprophytische Korallenwurz, Coralliorhiza innata, und das in den Vegetationsorganen sehr ähnliche Epipogon aphyllus in ihren korallenförmigen, dichotom verzweigten Rhizomen einen Pilz mit Schnallenfusionen, der ein Basidiomycet sein dürfte. Einige andere Orchideen führen Sporangiolenverpilzung (S. 952).

2b) Mycel mit regelmäßiger Querwandbildung; keine Resorption von Pilzelementen: Ericaceen und Pirolaceen. Die Ericaceen besitzen (Frank) feine, fadenförmige Wurzeln, die sich aus einem sehr dünnen Zentralkörper und einer nur aus etwa 6 Zellreihen bestehenden großzelligen Epidermis aufbauen. Nur diese Epidermiszellen sind mit dichten Massen feiner Pilzhyphen angefüllt, die auch außerhalb der Epidermis eine Art von ektotropher M. bilden.

Die M. der Ericaceen ist sehr regelmäßig und auf allen Bodenarten vorhanden, so auf Moor bei Vacciniumarten, Ledum, Andromeda und Empetrum, auf Haide bei Calluna und Vacciniumarten. Auch bei Topfexemplaren von Azalea und Rhododendron hat sie Frank gefunden.

Ch. Ternetz (1907) hat eine Reihe von Isolierungen vorgenommen und verschiedene Arten „Pycnidenpilze" (Phoma spec.) in Kultur erhalten. Zwar ist es nicht sicher, daß die Pilze wirkliche Endophyten der zur Isolierung verwandten Ericaceenwurzel sind, doch spricht dafür die Tatsache, daß bei jeder untersuchten Ericaceenart ein anderer Pilz gefunden wurde.

Diese Pilze wachsen auf stickstofffreien Nährböden und sind, wie Ternetz durch sehr genau ausgeführte Analysen nachgewiesen hat, Sammler des atmosphärischen Stickstoffs. Die Tätigkeit ist sehr bemerkenswert, da auf Haide und Moorboden andere Stickstoffsammler, wie Azotobacter und Clostridium fehlen. Die Ericaceensymbiose scheint erblich zu sein. Bereits

die Samen enthalten in der Samenschale Pilzhyphen. Ternetz fand bei Samen von Andromeda polifolia, die in der Kapsel gekeimt hatten, in die Kapselwand eingesenkte Würzelchen bereits verpilzt. Wie die Pilze in die Frucht gelangen, ist unbekannt.

Die M. der mit den Ericaceen nahe verwandten Pirolaceen unterscheidet sich durch die Lokalisierung der Verpilzung auf besondere verdickte „Kurzwurzeln" (Kramár). Wie dort beschränkt sich die Verpilzung auf die großen Epidermiszellen, die dicht mit Mycel angefüllt sind, und einen ektotrophen Pilzmantel, der mit diesem in Verbindung steht.

Die grünen Pirolaceen haben in Größe und Bau stark reduzierte, äußerlich denen der Orchideen ähnelnde Samen, die aseptisch den Kapseln entnommen und auf einen sterilisierten Nährboden gebracht, nicht keimen (Burgeff), weshalb die Vermittlung des Pilzes bei der Keimung angenommen werden darf.

Die M. der Monotropa hypopitys (Fichtenspargel), der bekannten farblosen Pirolacee, weicht von der der übrigen grünen Pirolaceen stark ab. Die Form der Verpilzung steht der ektotrophen scheinbar nahe, unterscheidet sich aber in wesentlichem von ihr.

Die wenig verzweigten, sehr zerbrechlichen Wurzeln sind in humösem Boden mit einem pseudoparenchymatisch dichten Pilzmantel umgeben und entbehren der Wurzelhaare völlig. Die Hyphen des Pilzmantels dringen nicht wie bei den echten epiphytischen M. zwischen die Zellen der Epidermis ein, sondern entsenden Haustorien in diese, die in der Nähe des Zellkerns mit einer Anschwellung endigen. Die Zellen enthalten Vakuolen mit gerbstoffhaltiger Flüssigkeit. Eine Pilzverdauung findet nicht statt. Vielmehr degenerieren die epidermalen Schichten bei der alten Wurzel und werden durch eine vielfach widerstandsfähigere Exodermis ersetzt. Peclo, der die Monotropa zuletzt untersuchte, nimmt an, daß die Haustorien absorbierende Organe darstellen, vermittels deren der Pilz der Pflanze Stoffe zum Aufbau des Wurzelmantels entzieht. Die Bedeutung des Pilzes für die Pflanze sieht er in der durch Pilzsekrete verursachten Lösung der Bodensubstanzen, die die Pflanze, organische, wie anorganische, elektiv absorbiert. In tonigem Boden hat Peclo fast mycorrhizenfreie Exemplare der Pflanze aufgefunden, die imstande sein sollen, organische Nahrung selbständig zu erwerben; sie verfügen über ein weit umfangreicheres Wurzelsystem als die auf humösem Boden.

Die holosaprophytische Pflanze, die des Chlorophylls gänzlich entbehrt, galt in früheren Zeiten für einen Parasiten, der auf Wurzeln von Waldbäumen schmarotzen sollte. Schacht konnte die Verbindung mit den Baumwurzeln nicht auffinden. Drude (1873) glaubte sie gesehen zu haben und bildet sie auch ab. Die neueren Untersucher (Kamienski, Sarauw, Mac Dougal, Peclo) halten sie für nicht vorhanden.

Die Samen der Monotropa sind derartig reduziert, daß auch für sie, wie für die grünen Pirolaceen Keimungsmycotrophie wahrscheinlich ist. Drude hat die Keimpflänzchen in Form kleiner, etwas verzweigter Würzelchen frei und ohne Verbindung mit Baumwurzeln im Humus aufgefunden.

Ueber die Art des Pilzes ist nichts bekannt.

Kalifornische Verwandte der Monotropa, Sarcodes sanguinea (Oliver) und Pterospora Andromedae (Mac Dougal) besitzen eine fast analoge Form der Verpilzung bei extremem Saprophytismus.

2c) Mycel ohne regelmäßige Querwandbildung in der Pflanze. Resorption von Hyphenendigungen. Entstehung von Sporangiolen: Pflanzen mit Sporangiolenpilzen. Mit Sporangiolenpilzen in Symbiose lebende Pflanzen sind außerordentlich weit verbreitet. Die meist fast ganz querwandlosen dicken Hyphen dringen durch die Epidermis — häufig durch besondere Organe: Durchlaßzellen — in die Rindenschicht der Wurzeln ein. Dabei verlaufen sie inter- oder intrazellulär, zuweilen in einer Zellschicht auf die eine, in anderen auf die andere Weise. Sie bilden häufig an Hyphenendigungen blasige Anschwellungen, sogenannte Vesikel, die Reservestoffe enthalten und den Pilz, wenn das verpilzte Organ der Pflanze abstirbt, reproduzieren können. Noch häufiger dienen sie als Speicherstellen für Reservestoffe, die bei der Ausbreitung des Mycels wieder entleert werden können. Außer ihnen entstehen an feinen Verzweigungen immer intrazellulärer Hyphenenden — Arbuskeln — unter Einwirkung des Pflanzenplasmas Ergüsse amorpher Pilzsubstanz in die Zelle, die als meist zusammengesetzte kugelige Klumpen — Sporangiolen — von dieser resorbiert werden (Fig. 13, 14).

Sporangiolenverpilzung ist bei den meisten untersuchten Familien höherer Pflanzen nachgewiesen (Janse, Gallaud), auch im Thallus mancher Thallophyten kommt sie regelmäßig vor.

Einige Beispiele seien aus der Fülle von Fällen herausgegriffen:

Podocarpus. Bei den Arten der Coniferengattung Podocarpus finden sich Wurzelknöllchen, die hier nicht von Bakterien, sondern von Sporangiolenpilzen bewohnt sind (Shibata), und über die sehr genaue Untersuchungen vorliegen. Nobbe und Hiltner konnten zeigen, daß Podocarpuspflanzen 5 Jahre lang auf stickstofffreiem Sande zu wachsen vermochten, woraus die Möglichkeit, daß die Podocarpeen, wie Leguminosen und Erlen, Stickstoff assimilieren, nahe gerückt erscheint.

Liliaceen. Bei Disporum (Fig. 13) (Janse) und Colchicum (Gallaud) findet sich eine abweichende Verpilzungsform,

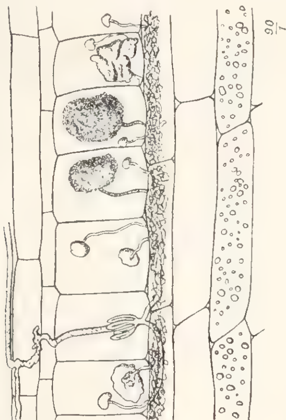


Fig. 13. Hochdifferenzierte Form von Sporangiolenverpilzung bei Disporum. Nach Janse.

die an zwei Zellschichten gebunden ist. In der inneren sind Hyphen mit normalen Sporangiolen vorhanden, die in die äußere aus besonders großen Zellen bestehende Abzweigungen entsenden, die an der Spitze blasig anschwellend zu Riesensporangiolen werden, deren Inhaltsstoffe der Pflanze anheimfallen. Zahlreiche andere Liliaceen führen normale Sporangiolenpilze (Fig. 14). Alle untersuchten Arten sind verpilzt.

Orchideen. Von den wenigen Orchideen, die eine Sporangiolenverpilzung führen, sei nur eine erwähnt. Gastrodia elata, eine laublattlose, saprophytische Orchidee Japans lebt in Symbiose mit dem Mycel eines bekannten Speisepilzes, des Hallimasch oder der Armillaria mellea. Die eigenartigen unterirdischen Mycelstränge (Rhizomorphen) dringen in toto in die Rinde des wurzellosen Pflanzenrhizoms ein und lösen sich hier in Einzelhyphen auf, die eine sehr komplizierte Form von Symbiose mit der Pflanze eingehen (Kusano).

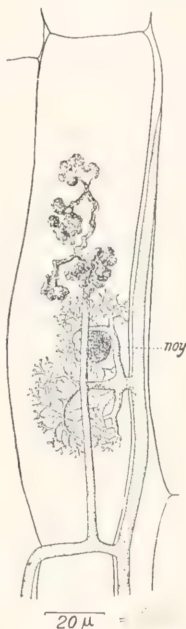


Fig. 14. Sporangiolenverpilzung. Primitive Form mit haustorienähnlichen Arbuskeln bei Allium sphaerocephalum. Nach Gallaud.

Burmanniaceen sind alle mycotroph; eine Reihe von Formen führt grüne Blätter, andere nähern sich der äußersten Grenze des Holosaprophytismus, was in der sehr weitgehenden Reduktion der Vegetationsorgane zum Ausdruck kommt. Gelbliche oder rötliche Gewächse mit Schuppenblättern an dem meist unverzweigten Stengel, mit einfachen oder koralloiden Wurzeln und dazu mit Blüten, deren absonderliche Formen man eher bei niederen Tieren als bei Pflanzen wiederfinden könnte, führen sie an schattigen Orten tropischer Wälder und Savannen ein verstecktes Dasein (Fig. 15).

Außer den vegetativen scheinen auch die reproduktiven Organe vereinfacht, so findet nach K. Mayer bei Thismia clandestina Parthenogenese statt. Die Samen der Burmanniaceen enthalten außer einem sehr primitiven (bis 10zelligen) Embryo noch wenige Endospermzellen, sind wie die der Orchideen sehr klein und bedürfen mit äußerster Wahrscheinlichkeit zur Keimung des endophytischen Pilzes.

Die Verpilzung der Wurzel zeigt Abweichungen vom Typus der Sporangiolenpilze. Bei Thismia clandestina und Thismia Aseroe kommt eine besondere Pilzwirtzell-

schicht vor. Die Pilzverdauung erfolgt langsam, so daß in jeder Zelle stets lebende Hyphen übrig bleiben. An den Enden

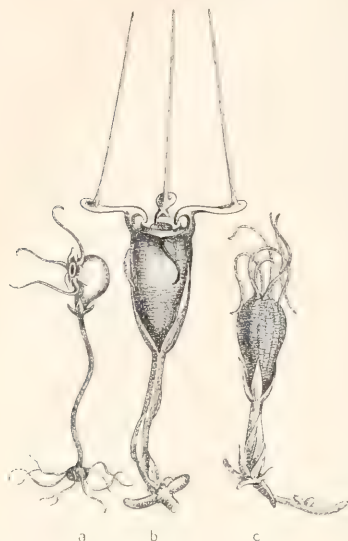


Fig. 15. Holosaprophytische Burmanniaceen. a Thismia macabensis. Nach Miers. b Th. Neptuni, c Th. Aseroe mit geschlossener Blüte. Nach Beccari.

einzelner Hyphen entstehen sehr große Sporangiolen, die vielleicht aus Vesikeln hervorgehen.

Solaneen. Bei südamerikanischen Verwandten unserer Kartoffel, (Solanum Commersonii und Solanum Maglia) kommt eine sehr typische Form der Sporangiolenverpilzung vor. N. Bernard, der sie entdeckte, vermutet einen Zusammenhang zwischen der Knollenbildung dieser Kartoffeln und der Verpilzung.

Aehnlich wie die Verpilzung der Burmanniaceen ist die der dikotylen Gentianeen, die in den Tropen ebenfalls holosaprophytische Vertreter besitzen.

2d) Mycel ohne regelmäßige Querwandbildung; keine nachgewiesene Resorption von Pilzelementen: Lycopodiaceen. Die Verbreitungsmittel der isosporen Archegoniaten, die Sporen, sind in weit höherem Grade an die Keimung im Licht gebunden, als die Samen der Phanerogamen. Diese bekommen als mehrzellige Gebilde eine größere Menge von Reservestoffen mit, die ihnen die Ausbildung der primitiven Vegetationsorgane ohne eigene Assimilation ermöglicht; jene müssen sie im Licht durch eigene Assimilationsarbeit erzeugen. Nur wenige Formen besitzen infolge ihrer Mycotrophie die Fähigkeit lichtunabhängiger Keimung und Entwickelung des den Sporophyten erzeugenden Gametophyten.

Die Sporenkeimung unserer mitteleuropäischen Lycopodien oder Bärlappe war lange Zeit in geheimnisvolles Dunkel gehüllt. 1858 erhielt De Bary die ersten Keimungsstadien der Sporen von Lycopodium inundatum. Verschiedene andere Botaniker fanden später (Goebel 1887) ältere Prothallien. Doch haben erst in neuer und neuester Zeit die Arbeiten Bruchmanns (1898, 1910) den geschlossenen Entwickelungsgang dieser Pflanzen festgestellt. Bruchmann hat dabei zwei verschiedene Typen der Entwickelungsform festgestellt, deren einem Lycopodium clavatum und Lycopodium annotinum, deren anderem Lycopodium selago folgt.

Lycopodium clavatum besitzt kugeltetraedrische Sporen, deren Exine (äußere Haut) eine netzförmige Struktur besitzt, die bei der Verbreitung eine Rolle spielt. Die Sporen gelangen durch den Einfluß von Wind und Regen in den Boden, wo sie ihre außerordentlich langwierige Entwickelung beginnen. Etwa 6 Jahre nach der Aussaat sind kleine fünfzellige, mit Rhizoid- und Scheitelzelle versehene Prothallien entstanden, die die in der Spore vorhandenen Reservestoffe verbraucht haben, stationär bleiben und endlich absterben, wenn nicht der Pilzsymbiont sie durch die Infektion zu weiterer Entwickelung veranlaßt. Die infizierende Hyphe dringt aus dem Boden in die Rhizoid- oder deren Nachbarzelle ein und erfüllt diese Zellen mit einem Knäuel von Pilzmycel. Sofort beginnt das Wachstum des Prothalliums und die Speicherung von Reservestoffen. Die Scheitelzelle gliedert nach zwei Seiten Segmente ab, die durch perikline Wände je in eine zentrale und eine peripherische Zelle zerlegt werden. Die entstehende zentrale Zellgruppe bleibt zunächst pilzfrei, die peripheren Zellen werden in einigem Abstand von der Scheitelzelle infiziert. Frühzeitig stellt die Scheitelzelle ihr Wachstum ein und wird durch antikline Wände in ein Meristem zerlegt, dessen Teilungen einen rübenförmigen Körper aus dem Prothallium entstehen lassen, der sich später im oberen Teile verbreitert und auf seinem Scheitel in pilzfreiem Gewebe die Geschlechtsorgane, Antheridien und Archegonien, ausbildet. Während dessen hat sich der Pilz in den außermeristematischen Zellen des ganzen Prothalliums ausgebreitet

und berührt die Epidermis nur mehr an den Stellen, wo er durch die zahlreich an der Peripherie entstandenen Rhizoiden ins Substrat auswandert. In den äußeren Zellschichten ist er intrazellulär in Form normaler Mycelknäule aus unseptierten Hyphen. In den erst später infizierten zentralen Prothalliumteilen wird er interzellulär und erzeugt ein dichtes Geflecht zwischen den Zellen. Eine Verdauung des Pilzes, wie wir sie bei den Orchideen finden, hat nicht statt. Der Pilz hat augenscheinlich direkt durch auswandernde Hyphen und indirekt vielleicht durch abgesonderte Enzyme eine wichtige Funktion bei der Löslichmachung und, da alle aufgenommenen Stoffe die Pilzschicht passieren müssen, auch bei der Umformung der organischen Humussubstanzen. Seine Wirksamkeit wird demonstriert durch die reichen im Prothallium gespeicherten Stärkemengen, aus denen auch einer oder mehrere junge aus befruchteten Eizellen entstandene Embryonen ihre Nahrung beziehen, bis sie aus dem tief im Boden liegenden Prothallium ans Tageslicht heranwachsen, ihre Blätter entfalten und als selbständige Sporophyten zu leben beginnen. Die ganze unterirdische Entwickelung des Gametophyten ist von außerordentlicher Langsamkeit und kann 15 bis 20 Jahre in Anspruch nehmen.

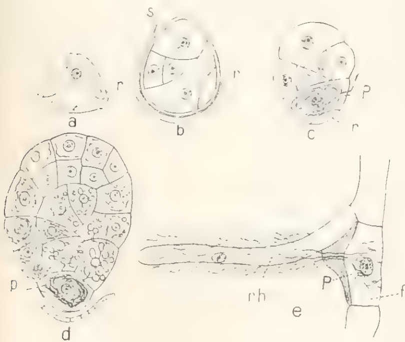


Fig. 16. Lycopodium selago. Spore zu Beginn der Keimung, b Prothallium im Empfängnisstadium, c dasselbe infiziert, d späteres Stadium, e Haarfußfersenzelle, (r Rhizoidzelle, s Scheitelzelle, p Pilz, rh Rhizoid, f Fersenzelle). Nach Bruchmann.

Bei dem zweiten Typus, bei Lycopodium selago (Fig. 16), entwickelt sich die Spore etwas rascher zum 5zelligen Empfängnisstadium. Die fernere Ausbildung ist ebenfalls eine raschere und weicht durch den dorsiventralen Wuchs des Prothalliums im späteren Stadium etwas ab. Eine Aussaat Bruchmanns zeigte schon nach 6 Jahren erwachsene Prothallien mit mehrblättrigen Keimpflanzen (vgl. Lycopodiaceen). Der Pilz des Prothalliums von Lycopodium selago ist rein intrazellulär, erfüllt die einen Zellen mit filzigen Mycelmassen und bildet in anderen bläschenförmige Anschwellungen (Vesikel, nach Bruchmann Sporangiolen). Eine Resorption des Pilzes in den Zellen erfolgt auch hier nicht.

Ganz besonderes Interesse verdient eine Einrichtung an dem Prothallium, die die Auswanderung des Pilzes regelt. Von dem Fußteil jedes jungen Rhizoids wird durch eine Wand der vom Scheitel des Prothalliums abgekehrte Teil abgeschnitten und die entstehende „Haarfußfersenzelle“ nach außen mit einer stark verdickten Cellulosewand versehen. Die Zelle dient als „Provokationszelle“ für den Pilz, der regelmäßig aus dem Innern des Prothalliums herbeigezogen, durch sie auswandert, indem er ihre Cellulosewand an präformierter Stelle durchbricht. Außerhalb des Prothalliums umgeben dann die Hyphen das Rhizoid und hüllen es dicht in Mycel ein, was für die Lösungsfunktion des Pilzes zu sprechen scheint.

Aehnliche Verhältnisse hat auch Treub bei dem Prothallium des tropisch-epiphytischen Lycopodium phlegmaria aufgefunden. Außer diesen holosaprophytischen kommen auch noch schwächer verpilzte und grüne Prothallien vor (Lycopodium inundatum und Lycopodium cernuum). Eine Art (Lycopodium salakense) entwickelt ihre Prothallien ganz selbständig.

Die den Lycopodiaceen sehr nahe verwandte Familie der Psilotaceen besitzt ohne Zweifel ebenfalls holosaprophytische Prothallien. Selbst der in seinen Vegetationsorganen stark reduzierte Sporophyt ist regelmäßig verpilzt. Die Form der Verpilzung ähnelt in einigem der der Orchideen. Das unterirdische Rhizom der Pflanze enthält Pilzwirt- und Verdauungszellen (Shibata).

Saprophytische unterirdische Prothallien finden sich noch bei den Gattungen und Arten der Ophioglosseen, die bei zwei einheimischen Arten (Ophioglossum vulgatum und Botrychium lunaria) ebenfalls von Bruchmann entdeckt wurden. Auch die grünen Sporophyten haben stark verpilzte Wurzeln (Sporangiolenpilze).

Die Isolierung der mit Pteridophyten in Symbiose lebenden Pilze ist noch nicht gelungen. Gemeinsam ist ihnen das Fehlen regelmäßig septierter Hyphen, die nur in einem Falle in den Rindenzellen des Psilotumrhizoms beobachtet wurden.

2e) Mycel ohne regelmäßige Querwandbildung; keine Resorption von Pilzmycel: Jungermanniaceen.

Während im Thallus der thallosen Lebermoose Sporangiolenpilze vorkommen, weicht die Form der Verpilzung der foliosen Jungermanniaceen hiervon ab. Nemec hat eine gut differenzierte Verpilzungsform bei Calypogeia trichomanes beschrieben. Garjeanne hat andere Arten studiert, so Lophozia inflata und Cephalozia bicuspidata.

Die Infektion der Lebermoose erfolgt durch die Wand der Rhizoide, die durch Ausbildung von eigenartigen Celluloseverdickungen darauf reagieren können. Vom basalen Teil des infizierten Rhizoids verlaufen kurze Haustorien in die benachbarten Thalluszellen. Bei Cephalozia liegt ein Mycelknäuel in der erweiterten Spitze des Rhizoids.

Garjeanne hat versucht, den Pilz von Alicularia scalaris zu isolieren und einen Mucor (M. rhizophilus Garj.) erhalten, mit dessen Reinkultur er auf mineralischer Nährlösung kultivierte Pflanzen infizieren konnte. Ueber die Bedeutung der zwar weit verbreiteten aber nicht obligatorischen Verpilzung der Lebermoose ist nichts bekannt. Von einem Parasitismus des Pilzes kann keine Rede sein, da jede Schädigung der Zellen ausbleibt. Es ist somit berechtigt, die Verpilzung der Lebermoose zur Mycorrhiza zu rechnen.

3. Ektotrophe Mycorrhizen. Ektotrophe (= epiphytische) Mycorrhizen sind bei den meisten baum- oder strauchförmigen Holzgewächsen unserer Zone, soweit sie auf unkultiviertem Lande wachsen, vorhanden.

Zuerst beschrieben wurden sie von Hartig (1840), der aber die Pilznatur dieser Gebilde nicht erkannte. Durch die Frankschen Arbeiten (vgl. Einleitung zur M.) wurde ihre weite Verbreitung bekannt, und es haben sich in der Folge viele Botaniker, besonders Dendrologen mit der Sache bebeschäftigt.

Der wirksame Apparat einer ektotrophen M. (Fig. 17) ist an besonderen, langsam wachsenden und dicklichen „Kurzwurzeln" orientiert, die die letzten Verzweigungen der Hauptwurzeln darstellen. Sie entbehren der Wurzelhaare und sind samt ihrer Wurzelhaube dicht umhüllt von einem pseudoparenchymatischen Mantel aus Pilzmycel. Von diesem Mantel aus wachsen nebeneinanderliegende Hyphen unter Lösung der Substanz der Mittellamelle zwischen die radialen Wände der epidermalen Zellschichten (deren je nach Art des Baumes eine, zwei oder drei vorhanden sein können). Sie bilden hier ein Gewebe, das Sarauw (1903) nach dem ersten Beobachter Hartigsches Flechtwerk (voile d'Hartig) nennt, dringen aber nicht in die Zellen ein.

Der sehr dichte Pilzmantel ist nach außen entweder glatt, oker mit in zentrifugaler Richtung ausstrahlenden Hyphen

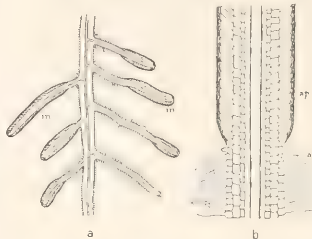


Fig. 17. a Kurzwurzeln der Edelkastanie (Castanea vesca) bis auf eine zu einer glatten Mycorrhiza umgewandelt, im Längsschnitt, b ein Stück stärker vergrößert, zeigt den Uebergang der verpilzten in die unverpilzte, mit Wurzelhaaren versehene Zone. Nach Mangin.

versehen, die nach Mangin (1910) verschiedene Differenzierung aufweisen (Fig. 18). So können flockige Hyphenbündel ins Substrat verlaufen, sie können aber auch in derselben Entfernung von der Wurzel endigend, längere oder kürzere Haare von mannigfacher Gestalt darstellen, die Wurzelhaaren außerordentlich ähnlich sind.

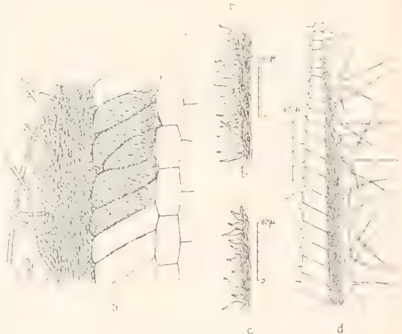


Fig. 18. Verschiedene Oberflächenbeschaffenheit bei ektotrophen Mycorrhizen. a Flockig, bei der Eiche (Quercus robur), b haarig, bei der Kiefer (Pinus sylvestris), c ebenso, bei einer Form der Eßkastanie, d bei einer anderen Form dieses Baumes. Nach Mangin.

Die rascher wachsenden Hauptwurzeln sind gelegentlich auch verpilzt, besitzen jedoch einen weniger regelmäßig ausgebildeten Pilzmantel und häufig noch nebenbei Wurzelhaare (Sarauw).

Ueber die Bedingungen des Auftretens der epiphytischen M. haben sich die Forscher lange nicht einigen können. Frank nahm das Vorhandensein von Humus im Boden als notwendige Bedingung des Auftretens der M. an. Moeller behauptete auf Grund von Versuchen mit jungen Kieferpflanzen in schroffer Weise das Gegenteil. Auf reinem Sandboden sollte die M. immer, auf Humus nie auftreten. Spätere Arbeiten von Tubeuf und P. E. Müller haben diese Behauptung auf das richtige Maß zurückgeführt. Wir können heute sagen, daß die Angehörigen der Familien Abietineen, Cupuliferen, Betulaceen (exkl. Alnus), Corylaceen und Salicaceen (soweit sie Bewohner trockenen Bodens) auf humösem Boden regelmäßig verpilzt sind und daß einige von ihnen, so die Kiefernarten auch auf humusarmen Sande M. auszubilden und zu gedeihen vermögen.

Ueber die Pilze, die die M. hervorrufen, ist wenig bekannt. Isolierungsversuche haben kein einwandfreies Resultat gezeitigt.

Moeller fand Arten von Mucorineen; Peclo Penicilliumarten. Diese Befunde mögen darauf zurückzuführen sein, daß die verpilzten Rindengewebe der Wurzeln nach einiger Zeit absterben und bis an die verkorkte Exodermis von saprophytischen Pilzen vernichtet werden, die die Untersucher in Kultur erhielten.

Wahrscheinlicher handelt es sich um gewisse, vielleicht zu verschiedenen Gattungen gehörende Ascomyceten und Hymenomyceten (Boudier, Rees, Woronine, Noack, Fuchs). Letztere sind fast sicher dabei beteiligt, da das Mycel mancher Pilzmäntel Schnallenanastomosen besitzt, die für sie charakteristisch sind.

Von Fuchs mit einer Reihe kultivierter Basidiomyceten versuchte Synthesen von Pilz und Keimpflanze haben leider keinen entscheidenden Erfolg gehabt.

Ueber dei Bedeutung der ektotrophen Verpilzung für die Waldbäume existiert eine umfangreiche Literatur.

Pfeffer (1877) und anfänglich auch Frank sahen sie in der Absorption des Wassers und der anorganischen Salze aus dem Boden doch hat erst Stahl (1900) diese Ansicht zur begründeten Hypothese erweitert. Er schließt aus dem Vorkommen sehr zahlreicher Organismen im Waldesboden auf einen intensiven Kampf um die Nährsalze, bei dem der Baum als Konkurrent auftreten kann, wenn er Organismen, die chemotropisch so fein auf Mineralsalze reagieren, wie die Pilze, als absorbierende Organe besitzt. Die neuen Untersuchungen von Mangin, der bei verschiedenen Pflanzen Pilzmäntel mit richtig differenzierten Haaren auffand, bieten eine wertvolle Illustration zu dieser Auffassung.

Frank hat in späteren Jahren seine Ansicht dahin abgeändert, daß die Pilze dem Baum stickstoffhaltige Humussubstanzen vermitteln sollten; hatte er in den Wurzeln doch keine Nitrate finden können. Tubeuf ist ähnlicher Ansicht, insofern er in dem möglicherweise durch den Pilz aus der Atmosphäre oder dem Humus vermittelten Stickstoff eine Unterstützung des Baumes sieht, hält aber die M. für keine im Leben des Baumes absolut notwendige Einrichtung. Andere Forscher, wie Sarauw und Moeller erkennen der M. überhaupt nur sehr problematischen Wert zu.

Eine Reihe von verschiedenen Botanikern unternommene Versuche, bei denen man junge Pflanzen von Waldbäumen teils auf sterilisiertem, teils auf nicht sterilisiertem Böden (oder auf Mischungen von beiden) kultivierte, leiden an dem Fehler, daß die bei jeglicher Art von Sterilisierung stattfindende Aufschließung der Bodenbestandteile und die damit zusammenhängende Bereicherung des Bodens an Nahrungsstoffen einen Vergleich der Kulturen unmöglich macht.

Eine Sonderstellung unter den Waldbäumen nehmen die Kiefern ein, insofern sie auf stickstoffarmem Boden zu gedeihen vermögen und dort sogar das Wachstum anderer Bäume (Fichte neben der Bergkiefer auf Sandboden) ermöglichen. Sie verfügen außer den auch den übrigen Bäumen eigentümlichen M. über eine besondere durch dichotome Verzweigung hervorgehende, korallenähnliche, verpilzte Wurzelform, die trotz ihres Pilzmantels vielleicht von einer endotrophen Verpilzung erzeugt, ihnen die Assimilation freien Stickstoffes ermöglichen könnte (P. E. Müller).

C. Pflanzen und Fadenpilze (Nichtmycorrhizen).

Lolium temulentum und sein Pilz. Eine von der M. sehr verschiedene Form von Symbiose höherer Pflanzen mit Pilzen, die an gewisse pathogene Brandpilzinfektionen erinnert, ist bei Loliumarten (Gramineae), besonders Lolium temulentum dem „Taumellolch" bekannt geworden. Das durch seine Giftigkeit bekannte Gras hat unverpilzte Wurzeln. Der Pilz befindet sich interzellular in den oberirdischen grünen Teilen der Pflanze, so in der Achse und den Blattbasen und infiziert von da aus das Nucellargewebe der jungen Samenanlagen. In der reifen Frucht bildet er eine zusammenhängende dichte Schicht zwischen Alleuronschicht und Samenschale und ist auch schon in den Stammscheitel des Embryo hinübergewachsen, von wo aus er bei der Keimung die junge Pflanze infiziert. Er folgt dem Vegetationspunkt nach, bis er wieder in den Blüten angelangt ist (Freeman).

Dieser Prozeß wiederholt sich unablässig bei jeder Generation und hat schon vor

4000 Jahren in derselben Form bestanden, wie pilzinfizierte Körner des Taumellolchs aus den ägyptischen Königsgräbern beweisen (Lindau).

Daß die Giftigkeit des Taumellolchs mit der Verpilzung zusammenhängt, hat Hannig gezeigt. Er hat Rassen von Lolium temulentum aufgefunden, die sich dauernd pilzfrei kultivieren ließen und damit Vergleichsmaterial verpilzter und unverpilzter Körner erhalten. Die verpilzten enthalten ein Alkaloid (Temulin?), das den unverpilzten fehlt. Weiter konnte Hannig den schon von Hiltner versuchten Nachweis erbringen, daß der Loliumpilz in Verbindung mit der Pflanze geringe Mengen atmosphärischen Stickstoffs (ca. 10 mg für die mit Pilz und ohne Stickstoff kultivierte Pflanze) zu binden imstande ist, und daß verpilzte Früchte mehr Stickstoff enthalten als unverpilzte.

Die Kultur des Pilzes außerhalb der Pflanze ist trotz zahlreicher Versuche noch nicht gelungen. Ueber die systematische Zugehörigkeit existieren nur Vermutungen.

Literatur. *Zu Pflanzen und Bakterien:* **Lafar**, *Handbuch der technischen Mycologie, Bd. 3, Kap. 2 (Hiltner).* — **J. Peclo**, *Die pflanzlichen Actinomycosen. Centralblatt für Bakteriologie und Parasitenkunde, 2. Abt., Bd. 27, 1910.* — **F. C. von Faber**, *Das erbliche Zusammenleben von Bakterien mit tropischen Pflanzen. Jahrb. f. wiss. Bot., LI, Heft 3, 1912.* — *Zu Pflanzen und Mycorrhizen:* **E. Stahl**, *Der Sinn der Mycorhizenbildung. Jahrb. f. wiss. Bot., 34, 1900.* — *Orchideen:* **N. Bernard**, *L'évolution dans la Symbiose. Ann. Sc. Nat., 9. sér., Bot. IX., 1909.* — **H. Burgeff**, *Die Wurzelpilze der Orchideen, Jena 1909.* — **Derselbe**, *Die Anzucht der tropischen Orchideen aus Samen, Jena 1911.* — *Ericaceen und Pirolaceen:* **Ch. Ternetz**, *Ueber die Assimilation des atmosphärischen Stickstoffs durch Pilze. Jahrb. f. wiss. Bot., XLIV.* — **U. Kramár**, *Studie über die Mycorhiza von Pirola rotundifolia. Bull. Int. Acad. Sc. Prague VI.* — **J. Peclo**, *Die epiphytischen Mycorrhizen usw. Bull. d. böhm. Akad. d. Wiss., 1908.* — *Sporangiolenpilze:* **I. M. Janse**, *Les endophytes radicaux de quelques plantes javanaises. Ann. jard. Bot. Buitenzorg., XIV, 1897.* — **I. Galland**, *Études sur les mycorhizes endotrophes. Rev. gén. de Bot., XVII, [illegible].* — *Lycopodiaceen:* **H. Bruchmann**, *Die Keimung der Sporen und die Entwickelung der Prothallien von Lycopodium clavatum L., L. annotinum L. and L. selago L. Flora, [illegible], 1910.* — *Lebermoose:* **A. I. M. Garjeanne**, *Die Verpilzung der Lebermoosrhizoiden. Flora 2 (102), 1911.* — *Ektotrophe Mycorrhizen:* **Sarauw**, *Sur les mycorhizes des arbres forestiers et sur le sens de la symbiose des racines. Revue Mycol., [illegible].* — **L. Mangin**, *Introduction à l'étude des mycorhizes des arbres forestiers. Nouv. Arch. du Muséum d'Hist. Nat., 5. sér.* — *Zu Pflanzen und Nichtmycorrhizen: Loliumpilz:* **E. Hannig**, *Ueber pilzfreies Lolium temulentum. Bot. Zeit. 65 [illegible].* — **Derselbe**, *Die Bindung freien atmosphärischen Stickstoffs durch pilzhaltiges Lolium temulentum. Ber. d. Deutsch. bot. Ges., 1908, XXVIa.*

H. Burgeff.

Sympathisches Nervensystem.

1. Bau und Funktion des sympathischen Nervensystems. 2. Allgemeine Eigenschaften des sympathischen Nervensystems insbesondere der Ganglien. Sauerstoffbedürfnis, Ermüdbarkeit, Summationsfähigkeit, Tonus. Die Wirkung von Giften auf das sympathische Nervensystem. 3. Die durch das sympathische Nervensystem vermittelten Reflexe. Abhängigkeit der Reflexe von Qualität, Intensität und Dauer der Reize. Reflextonus. Reflexkoordination. Die für das sympathische Nervensystem charakteristischen Eigenschaften.

1. Bau und Funktion des sympathischen Nervensystems. Als sympathisches Nervensystem wird jener Abschnitt des Wirbeltiernervensystems bezeichnet, welcher das Herz, die Blutgefäße, den Darm, die Drüsen und Geschlechtsorgane mit Nervenfasern versorgt und dessen Funktion uns unter gewöhnlichen Verhältnissen weder zum Bewußtsein kommt, noch willkürlich beeinflußt werden kann.

Das sympathische Nervensystem verlangsamt und beschleunigt den Herzschlag, es erweitert und verengert die Blutgefäße und tritt dadurch auch in den Dienst der Wärmeregulation. Werden z. B. die sympathischen Nervenfasern, welche zu den Blutgefäßen des Kaninchenohres hinziehen, durchschnitten, so erweitern sich die Gefäße; es durchfließt sie in der Zeiteinheit eine größere Menge körperwarmen Blutes; es wird mehr Wärme nach außen abgegeben. Das Ohr, dessen sympathische Fasern durchtrennt sind, fühlt sich bedeutend wärmer an.

Das sympathische Nervensystem regelt die Bewegung des Darmes, indem es auf die Nervenzellen einwirkt, welche in der Darmwand gelegen sind und die charakteristische, peristaltische Bewegung des Darmes vermitteln. Durch das sympathische Nervensystem wird die Geschwindigkeit und Stärke der Darmbewegung beherrscht. Ist die Darmbewegung beschleunigt, so passiert der Nahrungsbrei schneller den Darm und wird dadurch weniger ausgenützt und nicht eingedickt. Ist die Darmbewegung verlangsamt, so bleibt der Nahrungsbrei länger im Darm liegen, er wird stärker eingedickt, Fäulnisprozesse finden in größerem Umfange statt. Die bei dieser Fäulnis entstehenden Abbauprodukte wirken ihrerseits giftig auf das sympathische Nervensystem und können schwere Vergiftungserscheinungen hervor-

rufen. Das sympathische Nervensystem innerviert ferner den Uterus, die Blase und die Harnwege.

Vom sympathischen Nervensystem werden die Drüsen des Körpers innerviert. Speichel-, Magensaft- und Gallensekretion, die Ausscheidung der Sekrete der Geschlechtsdrüsen werden in gleicher Weise durch das sympathische Nervensystem angeregt. Viele Körperdrüsen sezernieren Stoffe, welche ihrerseits die Erregbarkeit des sympathischen Nervensystems beeinflussen. Es seien hier die von der Schilddrüse produzierten Sekrete, das in der Leber gebildete Cholin, das in den Nebennieren gebildete Adrenalin angeführt.

In Anbetracht dieser Funktionen wird das sympathische Nervensystem auch als vegetatives Nervensystem bezeichnet, eine Bezeichnung, die jedoch nicht alle seine Funktionen berücksichtigt. Die Beeinflussung der Pupillenweite, die Innervation der Muskeln, welche die Haare aufrichten, kann nicht als vegetative Funktion bezeichnet werden. Wir wollen aus diesem Grunde die Bezeichnung vegetatives Nervensystem nicht verwenden.

Als sympathisch wird dieser Abschnitt des Nervensystems bezeichnet, weil er vielfach gleichzeitig mit willkürlichen Innervationen zu funktionieren beginnt, ohne daß wir uns dessen bewußt werden. Bei der willkürlichen oder auch reflektorischen Innervation einer Muskelgruppe erweitern sich ihre Blutgefäße, bei geistiger Arbeit erweitern sich die Gehirngefäße, bei der Verdauung werden die Blutgefäße des Darmes weiter. Die arbeitenden Organe werden in der Zeiteinheit von einer größeren Blutmenge durchflossen, es wird ihnen mehr Sauerstoff und mehr Nahrungsmaterial zugeführt, es wird gleichzeitig die Abfuhr der nicht verwendbaren, ja sogar giftigen Stoffwechselprodukte, beim Darm der Abtransport der gelösten und resorbierten Nahrung erleichtert. Es wird durch diesen Mechanismus ein ausdauernderes Arbeiten der Organe ermöglicht.

Die Nervenzellen des sympathischen Nervensystems liegen in verschiedenen Abschnitten des Nervensystems. Die Erregungen gelangen durch Vermittlung der Spinalganglien zum Rückenmark, erregen dort Strangzellen, die am Uebergang der Vorder- und Hinterhörner der grauen Substanz gelegen sind. Die Nervenfortsätze dieser Zellen leiten die Erregungen zu den sympathischen Ganglien, welche getrennt vom Rückenmark in den verschiedenen Körperhöhlen liegen; erst die Nervenfortsätze der Zellen dieser Ganglien treten an die Blutgefäße, Drüsenzellen usw. heran.

Es wäre durchaus verfehlt, sich nur mit der Funktion der sympathischen Ganglien zu beschäftigen, denn sie stellen nur einen Teil des Reflexbogens vor. Nur durch die Betrachtung der durch den ganzen Reflexbogen vermittelten Vorgänge und durch Berücksichtigung seiner Beziehungen zum übrigen Nervensystem ist ein Verständnis der Funktion des sympathischen Nervensystems möglich. Es ist dies ein Gesichtspunkt der Betrachtung, der bisher bei Erforschung der sympathischen Funktionen fast durchweg vernachlässigt worden ist.

Zum sympathischen Nervensystem gehören folgende Ganglien:

1. Der paarige Grenzstrang des Sympathicus, welcher rechts und links von der Wirbelsäule liegt und seine Fasern zu sämtlichen Organen des Körpers sendet.

2. Das paarige Ganglion stellatum, welches die Eingeweide der Brusthöhle innerviert.

3. Der Sonnenplexus (Plexus solaris oder coeliacus), welcher in der Bauchhöhle liegt und die Baucheingeweide mit Nervenfasern versorgt. Er ist unpaar, entsteht jedoch aus einer Reihe meist paariger Ganglien.

4. Das unpaare untere Eingeweideganglion für die im Becken gelegenen Eingeweide.

5. Der Plexus hypogastricus gleichfalls für die Beckeneingeweide, insbesondere die Geschlechtsorgane.

6. Eine Reihe paarige Ganglien für die Kopfeingeweide. Das Ganglion ciliare und oticum für das Auge, das Ganglion submaxilare und sublinguale für die Speicheldrüsen.

Die Nervenzellen der sympathischen Ganglien stammen von der Spinalganglienleiste ab, welche sich schon in einem frühen Entwickelungsstadium von der Anlage des Rückenmarks loslöst. Von der Spinalganglienleiste löst sich zuerst die Anlage des Grenzstranges des Sympathicus ab, und von diesem stammen die in den Körperhöhlen gelegenen sympathischen Ganglien.

Die Wege, welche die Erregung nimmt, um zu den sympathischen Ganglien zu gelangen, sind verschieden. Die sensiblen Fasern können ihren Ursprung in den Organen nehmen, welche durch das sympathische Nervensystem innerviert werden. Die sympathischen Ganglien können ferner von allen Sinnesorganen und sensiblen Nerven aus in Erregung versetzt werden. Die sympathischen Ganglien weisen anatomische Beziehungen zu den in der Großhirnrinde gelegenen Assoziationszentren auf und können von diesen aus oder, besser gesagt, gleichgleichzeitig mit diesen erregt werden.

Ein gutes Beispiel für den ersten Fall der sensiblen Innervation sympathischer Gan-

glien ist der Nervus depressor. Er nimmt seinen Ursprung an der großen Schlagader, er wird je nach dem Füllungszustand derselben stärker oder schwächer mechanisch gereizt und veranlaßt auf reflektorischem Wege, durch Vermittlung der Nerven des Herzens und der Blutgefäße eine Erniedrigung des Blutdruckes. Das Herz schlägt langsamer, die Blutgefäße werden weiter, es vermindert sich mit dem Sinken des Blutdruckes die mechanische Reizung der sensiblen Fasern des Depressor.

Diese Art der sensiblen Innervation ist jedoch nicht stark ausgebildet. Wie die Untersuchungen Langleys und Andersons gezeigt haben, enthalten die Nerven der sympathischen Ganglien nur wenig sensible Fasern. In dem den Kopf innervierenden Teil des Grenzstranges ließen sich keine sensiblen Fasern nachweisen, in dem von den Beckeneingeweiden kommenden Nervus hypogasticus sind einige sensible Nervenfasern aufgefunden worden.

Die vom sympathischen Nervensystem innervierten Organe unterscheiden sich aber nicht nur durch eine geringe Entwickelung der sensiblen Fasern von den vom übrigen Nervensystem innervierten Organen, sondern auch dadurch, daß ihre sensiblen Fasern keine Verbindung mit den sensorischen Zentren der Großhirnrinde aufweisen. Die Innervation des Darmes, des Herzens oder einer Drüse kommt uns niemals zum Bewußtsein. Die reiche sensible Innervation der Skelettmuskeln, der Gelenkkapseln, der Sehnen und ihre Verbindung mit den sensorischen Zentren der Großhirnrinde ist nicht nur für das Erlernen einer Reflexkombination, sondern auch für den Ablauf derselben von großer Bedeutung (vgl. den Artikel „Nervensystem. Allgemeine Physiologie des Nervensystems"). Dadurch, daß bei den durch das sympathische Nervensystem innervierten Organen die Wiedererregung durch das tätige Organ nur in geringem Maße vorhanden ist und dadurch, daß uns diese Wiedererregung nicht zum Bewußtsein kommt, ist das Erlernen sympathischer Innervationen außerordentlich erschwert.

Es liegen zwar Beobachtungen vor, welche zu zeigen scheinen, daß wir sympathische Innervationen wahrnehmen. Infolge eines plötzlichen Schreckens bleibt das Herz stehen, und der Stillstand ist von einem stechenden Schmerz in der Herzgegend begleitet. Die verstärkte Darmtätigkeit wird uns durch kolikartige Schmerzen deutlich. Diese Wahrnehmungen kommen jedoch, wie die Beobachtungen von Chirurgen gezeigt haben, durch Reizung der sensiblen Fasern des Herzbeutels bezw. des Bauchfelles zustande. Die Reizung des bloßgelegten Herzens, des freiliegenden Darmes wird nicht empfunden, mechanische Reizung des Herzbeutels oder des Bauch- oder Brustfelles löst dagegen regelmäßig Schmerzäußerungen aus.

Mit diesen Feststellungen kommen wir zu der zweiten Art der sensiblen Innervation sympathischer Ganglien, der sensiblen Innervation von den Sinnesorganen und sensiblen Nerven des ganzen Körpers aus. Reizung der sensiblen Fasern eines Nerven ruft immer eine Veränderung des Blutdruckes, d. h. eine Veränderung der Herztätigkeit und der Blutgefäßweite hervor.

Die Verbindung zwischen dem sympathischen und dem übrigen Nervensystem wird offenbar durch Strangzellen hergestellt, welche im Rückenmark liegen und die der Ausbreitung der Erregung über größere Partien des Nervensystems dienen. Diese Zellen sind durch ihre spezifische Reaktion mit Strychnin ausgezeichnet. Strychninvergiftung steigert die Erregbarkeit sämtlicher Reflexbögen einschließlich der Reflexbögen des sympathischen Nervensystems und bewirkt, daß bei Reizung ausgedehnte und intensive Reflexe erhalten werden.

Wir kommen schließlich zum dritten Weg, auf welchem den sympathischen Ganglien Erregungen zugehen. Dieser wird uns durch die Erfahrung gezeigt, daß durch bestimmte Assoziationen, die vom sympathischen Nervensystem innervierten Organe in Erregung versetzt werden. Bei einem freudigen Erlebnis schlägt unser Herz schneller, bei plötzlichem Schrecken bleibt das Herz stehen, die Blutgefäße des Kopfes verengern sich, das Gesicht erblaßt.

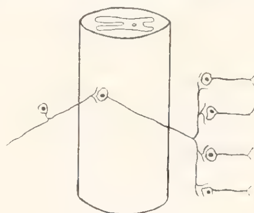
Ekel beschleunigt die Darmtätigkeit, der Anblick einer wohlschmeckenden Speise regt die Speichelsekretion an. Es gibt empfindsame Personen, bei welchen die Vorstellung eines erlebten Schreckens genügt, eine Verlangsamung oder einen Stillstand des Herzens herbeizuführen. Solche Personen können den Eindruck einer willkürlichen Beeinflussung des Herzschlages hervorrufen. Sie können diese Fähigkeit noch weiter ausbilden, indem sie die für das Lernen eines Reflexes notwendige Wiedererregung in der Peripherie in ihre Versuche einführen. Sie fühlen nach ihrem Puls und unterrichten sich dadurch andauernd von der Tätigkeit ihres Herzens. Auf gleiche Weise können wir eine Reihe sympathischer Innervationen willkürlich zu beherrschen lernen. Durch Vorstellung einer leckeren Speise können wir unsere Speichelsekretion anregen, durch Vorstellung einer Kälteempfindung können wir eine Gänsehaut hervorrufen, durch Einstellen des Auges für das Nahesehen ist es möglich, die Pupille zu verengern usf.

Wenn wir den Verlauf der Nervenfasern, welche vom Rückenmarke kommend zu den sympathischen Ganglien hinziehen, verfolgen, so machen wir die Beobachtung, daß die Nerven durch mehrere Ganglien hindurch laufen können. Es war eine wichtige Entdeckung, als Langley und seine Mitarbeiter an Hand verschiedener Versuche zeigten, daß die vom Rückenmark kommenden Fasern immer nur mit einer Ganglienzelle eines sympathischen Ganglions in Beziehung treten, durch die anderen Ganglien, welche sie auf ihrem Wege passieren, nur hindurchgehen, ohne mit den Nervenzellen derselben eine Verbindung einzugehen. Für diese Feststellung war die sogenannte Nikotinmethode von großer Bedeutung. Die Nervenzellen sämtlicher sympathischer Ganglien werden von dem Alkaloid Nikotin angegriffen, d. h. sie werden nach einer kurzen Erregung gelähmt. Werden einem Kaninchen einige Kubikzentimeter einer 0,5% Nikotinlösung in die Blutbahn injiziert, so wird die elektrische Reizung der bloßgelegten Fasern, welche vom Rückenmark zu den Ganglien hinziehen, unwirksam, die Reizung der von den Ganglien zu den Blutgefäßen oder den Drüsen hinziehenden Nerven bleibt wirksam, d. h. die Nervenfasern, die von den sympathischen Ganglien ausgehen, werden durch die verwendete Nikotinmenge nicht beeinflußt. Dasselbe Resultat ergibt die Aufpinselung der Nikotinlösung auf ein sympathisches Ganglion; die Reizung aller Nervenfasern, welche in diesem Ganglion mit einer Nervenzelle in Verbindung treten, wird unwirksam, während diejenigen Fasern, welche durch das Ganglion bloß hindurchlaufen, nicht beeinflußt sind.

Die Versuche mit der Degenerationsmethode ergaben das gleiche Resultat. Die Nervenfasern des sympathischen Nervensystems sowie die aller Nervensysteme degenerieren und gehen zugrunde, wenn sie durch einen Schnitt von ihren Nervenzellen getrennt worden sind (vgl. den Artikel „Allgemeine Physiologie des Nervensystems"). Wird ein Verbindungsast zwischen Rückenmark und den sympathischen Ganglien durchtrennt, so lassen sich die degenerierenden Fasern durch mehrere Ganglien hindurch verfolgen, bis zu jenem Ganglion, für welches auch die Nikotinmethode zeigt, daß die Nervenfaser hier an eine Nervenzelle herantritt.

Langley hat für die zu den sympathischen Ganglien hinziehenden, vom Rückenmark kommenden Fasern die Bezeichnung präganglionäre Fasern vorgeschlagen. Es sind die markhaltigen Fortsätze der im Rückenmark gelegenen Zellen des sympathischen Reflexbogens. Die präganglionären Fasern unterscheiden sich durch ihre weiße Farbe von den marklosen, daher graurot gefärbten Fasern, welche von den Nervenfortsätzen der Zellen der sympathischen Ganglien gebildet werden. Diese Fasern bezeichnet Langley als postganglionäre Fasern.

Wie nun die Untersuchungen von Bidder und Volkmann gezeigt haben, gehen von einem sympathischen Ganglion mehr postganglionäre Fasern ab, als zu ihm präganglionäre Fasern hingehen. Es muß sich daher die präganglionäre Faser teilen und jeder dieser Aeste mit einer Nervenzelle eines sympathischen Ganglions in Verbindung treten. Da sich jede der postganglionären Nerven mit einer größeren Anzahl von Zellen seines Erfolgsorganes verbindet, so muß es schon bei Reizung weniger präganglionärer Nerven zu einem ausgedehnten Reizerfolg kommen. Noch mehr ist dies der Fall, wenn die sensiblen Nerven des sympathischen Nervensystems erregt werden, da jede derselben sicher mit einer Anzahl von Strangzellen im Rückenmark verbunden ist. Wir sehen z. B. bei Reizung der Depressorfasern die Gefäße des ganzen Körpers mit einer Verringerung ihrer Spannung reagieren. Die Anordnung der nervösen Zellelemente im Reflexbogen des sympathischen Nervensystems ist in beistehender Figur 1 wiedergegeben.


Fig. 1.

Durch diese Anordnung seiner Elemente unterscheidet sich der Reflexbogen des sympathischen Nervensystems von dem des übrigen Nervensystems. Bei dem sympathischen Nervensystem eine Anordnung der Elemente, welche bei lokaler Reizung eine möglichst weite Ausbreitung der Reflexerregung ermöglicht, beim willkürlichen Nervensystem das Konvergieren aller Bahnen in gemeinsamen Strecken, in welchen, wie Sherrington gezeigt hat, die Interferenz der Erregungen stattfindet, die für das Zustandekommen der fein abgestuften und wohlkoordinierten Innervationen unserer Skelettmuskeln von ausschlaggebender Bedeutung ist.

An dieser Stelle seien auch die sogenannten Axonreflexe erwähnt, welche Langley beschrieben hat, denen er jedoch selbst keine

wesentliche Rolle im Geschehen des sympathischen Nervensystems zuschreibt.

Wir haben gehört, daß sich die vom Rückenmark kommende präganglionäre Faser teilt und mit mehreren sympathischen Nervenzellen in Verbindung tritt. Langley machte die Beobachtung, daß nach Durchschneidung der präganglionären Faser und Reizung eines ihrer Aeste, wie dies in Figur 2 an-

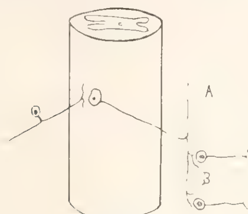


Fig. 2.

gedeutet ist, auch die von den anderen Aesten innervierten Organe in Erregung versetzt werden. Langley spricht von einem präganglionären Axonreflex. Auch postganglionäre Axonreflexe sind von Langley beschrieben worden. Ueber die Anordnung eines solchen Versuches kann die Figur 2 Aufschluß geben. Reizung des Nerven bei A löst eine Erregung in den von den Nervenzellen B innervierten Organen aus. Langley führt als analoge Erscheinung das Verhalten bipolarer Ganglienzellen an, deren Fortsätze auch nach Abtrennung der Nervenzellen die Erregung zu leiten imstande sind (vgl. den Artikel „Allgemeine Physiologie des Nervensystems"). Hier liegen jedoch die Verhältnisse ganz anders. Es ist wahrscheinlicher, daß eine Beobachtung vorliegt, welche dem Kühneschen Zweizipfelversuch am Musculus gracilis des Frosches entspricht. Die Nervenzweige, welche die beiden Abschnitte dieses Muskels versorgen, teilen sich schon außerhalb des Muskels. Bei Reizung des einen Muskelabschnittes kontrahieren sich auch die Fasern des anderen, durch einen Schnitt abgetrennten Teiles. Kühne stellt sich diese Miterregung so zustandekommend vor, daß die Erregung bis zur Verzweigungszelle der Nervenfaser geleitet wird und von dort auf die andere Faser übergeht. Ewald Hering dagegen glaubt — und dies scheinbar mit Recht — daß es sich bei diesem und vielen ähnlichen Versuchen bloß um eine sekundäre Erregung der Fasern durch den Aktionsstrom handelt, welche den Erregungsvorgang im gereizten Nerven begleitet und an der Teilungsstelle die anliegenden Fasern in Erregung versetzt.

2. Allgemeine Eigenschaften des sympathischen Nervensystems insbesondere der Ganglien. Es ist eine für das Verständnis der Bedeutung der sympathischen Ganglien wichtige Frage, ob sie in ihren Lebensäußerungen mit dem übrigen Nervensystem übereinstimmen.

Die Nervenzellen der sympathischen Ganglien unterscheiden sich genau wie die mit ihnen entwickelungsgeschichtlich verwandten Spinalganglienzellen durch ihr geringes Sauerstoffbedürfnis von den Zellen des übrigen Nervensystems. Diese Tatsache weist auf eine geringe Intensität der sich in ihnen abspielenden Stoffwechselvorgänge hin. Das Sauerstoffbedürfnis der sympathischen Ganglien läßt sich nachweisen, wenn die Blutzufuhr zu ihnen abgesperrt, oder das ganze Tier der Erstickung ausgesetzt wird. Nach einiger Zeit verlieren die sympathischen Ganglien ihre Leitfähigkeit, um sie nach neuer Blutzufuhr wieder zu erhalten. Wird ein Kaninchen durch Verbluten getötet, so erlischt die Reflexerregbarkeit des Tieres rasch, die Reizung der präganglionären Fasern erweist sich jedoch noch längere Zeit wirksam. Langendorff bediente sich bei seinen Versuchen als Indikator der Wirkung des Halssympathikus auf die Pupille. Die elektrische Reizung dieser Nerven bewirkt eine Erweiterung der Pupille, dabei muß die Erregung, um zu den Muskeln der Pupille zu gelangen, die Zellen des obersten Halsganglions passieren. Hört dieses auf, die Erregung zu leiten, so wird die Reizung des Halssympathikus unwirksam. Versuche, welche ich selbst zur gleichen Frage angestellt habe, haben ganz bedeutende Unterschiede in den Erstickungszeiten des Zentralnervensystems und der sympathischen Ganglien ergeben. In einem Falle war die Reflexerregbarkeit des Tieres schon 1½ Minuten nach dem Verbluten erloschen, während die Leitfähigkeit des obersten Halsganglions erst nach 35 Minuten verschwand. Langendorff hat bei seinen diesbezüglichen Versuchen auch die Beobachtung gemacht, daß die sympathischen Ganglien früher ihre Leitfähigkeit verlieren als die postganglionären Nervenfasern. Es fügt sich damit das Verhalten der Nervenzellen der sympathischen Ganglien der allgemeinen Erfahrung ein, daß das Sauerstoffbedürfnis der Nervenzellen größer ist als das ihrer Nervenfortsätze. Auch die Ermüdbarkeit der sympathischen Ganglien ist wesentlich geringer als die Ermüdbarkeit des Zentralnervensystems. Ich habe eine elektrische Reizung länger als eine halbe Stunde auf den Halssympathikus einwirken lassen, ohne eine wesentliche Verminderung des Reizerfolges beobachten zu können. Dieses Verhalten bestätigt einerseits die oben

ausgesprochene Vermutung, daß die Intensität der Stoffwechselvorgänge in den sympathischen Ganglien nicht groß ist, andererseits weist sie auch auf eine verhältnismäßig große Geschwindigkeit der Erregungsvorgänge in den Ganglien hin. Denn wenn 60 Reize in der Sekunde längere Zeit auf das sympathische Ganglion wirken, ohne es wesentlich zu ermüden, so muß der Erregungsvorgang, welcher durch jeden einzelnen Reizstoß ausgelöst wird, schon abgelaufen sein, wenn der nächste Reiz kommt. Wenn das nicht der Fall wäre, müßte unbedingt Ermüdung eintreten. Wie wir durch die Untersuchungen der letzten Jahre erfahren haben, beruhen eine Reihe von Eigenschaften, welche das Zentralnervensystem charakterisieren, auf der großen Intensität und der geringen Geschwindigkeit seiner Erregungsvorgänge; es beruhen darauf die starke Ermüdbarkeit, mit welcher die ausgeprägte Fähigkeit der Reizsummation, Reizbahnung und Hemmung zusammenhängt (vgl. darüber den Artikel „Nervensystem. Allgemeine Physiologie des Nervensystems"). Wir werden also schon von vornherein erwarten, daß diese Eigenschaften an den sympathischen Ganglien wenig oder gar nicht hervortreten. In der Tat hat sich die Reizsummation nur in geringem Maße nachweisen lassen und muß, wie eingehende Versuche gezeigt haben, in die langsam reagierenden Muskeln, die vom sympathischen Nervensystem innerviert werden, verlegt werden. Mullert zeigte, daß Reize, welche sich in Intervallen von 0,5 Sekunden folgen, schwache Summation hervorrufen, die in einer zunehmenden Verstärkung des Reizerfolges zum Ausdruck kommt. Nach P. Schultz besteht in der Summationsfähigkeit bei Reizung der prä- und postganglionären Fasern kein Unterschied. Es müssen also die Muskeln sein, welche die Reize summieren. Hemmungen und Bahnungen, sofern sie sich feststellen lassen, sind auch bei Reizung der postganglionären Fasern zu erhalten, sie können sich also auch nicht in den sympathischen Ganglien abspielen. Ebenso verhält es sich mit der Vermittlung einer dauernden tonischen Erregung. Es fehlt den sympathischen Ganglien, wenn ihre präganglionären Fasern durchtrennt sind, die Möglichkeit, von der Peripherie erregt zu werden, es ist, wie wir oben gehört haben, dann kein Reflexbogen mehr vorhanden, welcher Reize zu den Ganglien hinleiten könnte. Die Wirkung von Reizen ist aber für das Zustandekommen einer tonischen Erregung unbedingt notwendig. Eine tonische Erregung der sympathischen Ganglien könnte auch durch chemische Reize veranlaßt werden, welche durch das Blut ihnen zugeführt werden. Es ist bekannt, daß das im Blute kreisende Sekret der Nebennieren die Blutgefäßemuskeln zu einer dauernden Kontraktion veranlassen kann; das gleiche gilt von der Kohlensäure. Beide Stoffe greifen jedoch gleichfalls an den Muskeln bezw. an den Uebergangsstellen der Nerven zu den Muskeln an und haben keine wesentliche Wirkung auf die Ganglien. Schultz machte folgenden Versuch. Er durchschnitt einem Kaninchen den einen Halssympathikus, dadurch verengerte sich die Pupille. Ließ nun Schultz das Versuchstier eine Luft atmen, die reich an Kohlensäure war, so trat eine Erweiterung der Pupillen ein, die gleiche Erscheinung trat auch ein, nachdem das Halsganglion ausgeschnitten worden war. Die Kohlensäure muß demnach ihren Angriffspunkt in der Peripherie haben. Die Kohlensäurewirkung auf die ihrer Verbindung mit dem Nervensystem beraubten Pupillen oder Blutgefäßmuskeln steht in naher Beziehung zu der dauernden Verkürzung dieser und vieler anderen glatten Muskeln, welche längere Zeit nach Durchschneidung ihrer Nerven eintritt und die als Folge einer Entartung der Muskeln aufzufassen ist. Durch die Entartung nimmt die Reaktionsgeschwindigkeit der Muskeln wesentlich ab, dadurch wird ihre Summationsfähigkeit für alle Reize, welche sie direkt treffen, gesteigert, und sie reagieren schon auf schwache Reize mit einer dauernden Verkürzung. Es handelt sich in diesem Falle nur um eine scheinbar gesteigerte Erregbarkeit, für welche wir an allen lebenden Substanzen Analogien kennen. Für die nahe Beziehung der durch Kohlensäure und durch die Entartung bedingten dauernden Verkürzung spricht auch die Tatsache, daß Gefäßmuskel oder andere Muskeln, welche sich im Beginn der Entartung befinden, durch Kohlensäure oder andere, narkotisch wirkende Stoffe leichter in die dauernde Verkürzung versetzt werden als solche, deren Verbindungen mit dem Rückenmark erhalten sind. Diese Erscheinung wurde bisher als paradoxe Pupillenerweiterung oder Gefäßverengerung bezeichnet. An Hand unserer Erfahrungen über die allgemeine Verbreitung der scheinbaren Erregbarkeitssteigerung ist die Bezeichnung paradox nicht mehr gerechtfertigt.

Den angeführten Tatsachen kommt noch eine weitere Bedeutung zu, wenn wir sie von einem allgemein-physiologischen Standpunkt betrachten. Wir sehen eine Reihe von Eigenschaften, welche wir als charakteristisch für die Funktion der nervösen Zellelemente kennen, nicht in den sympathischen Ganglien lokalisiert, sondern Summation, Bahnung, Hemmung und Tonus haben ihren Sitz in den Erfolgsorganen selbst, einzig und allein dadurch, daß diese Erfolgsorgane eine

geringe Reaktionsgeschwindigkeit aufweisen. Einem gleichen Verhalten begegnen wir auch an anderen Formen lebender Substanz, z. B. an den Muskeln der Farbzellen vieler Weichtiere, an den Muskeln vieler Gliedertiere.

Die Beobachtungen an den Muskeln der Gliedertiere sind deshalb wichtig, weil wir bei ihnen einer Doppelinnervation begegnen, wie sie sich auch bei den vom sympathischen Nervensystem innervierten Organen nachweisen läßt. Eine Doppelinnervation müssen wir auch für die motorischen, im Rückenmark gelegenen Nervenzellen antagonistischer Skelettmuskeln postulieren.

Wenn wir die Wirkung der Nerven des sympathischen Nervensystems auf ihre Erfolgsorgane studieren, so finden wir, daß Nerven, welche zu dem gleichen Erfolgsorgan hinziehen, gerade den entgegengesetzten Reizerfolg aufweisen können.

Elektrische Reizung der mit dem Zungennerv verlaufenden sympathischen Fasern hat eine Verengerung der Blutgefäße der Speicheldrüse zur Folge. Reizung der in der Chorda tympani verlaufenden Fasern bewirkt eine Erweiterung der gleichen Gefäße. Reizung des zum Herzen hinziehenden Astes des Sympathikus ruft eine Beschleunigung des Herzschlages, Reizung der im Nervus vagus enthaltenen Fasern eine Verlangsamung bezw. Stillstand des Herzschlages hervor usf.

Wenn wir die Nerven, welche auf ihr Erfolgsorgan in entgegengesetztem Sinne wirken, nach dem Zentralnervensystem verfolgen, so sehen wir, daß sie verschiedenen Abschnitten desselben entstammen. Die Fasern kommen entweder aus dem Mittelhirn, aus dem verlängerten Mark, oder aus dem Brust-, Lenden- oder dem im Kreuzbein gelegenen Sakralmark. Die aus dem Mittelhirn, dem verlängerten Mark und dem Kreuzmark entspringenden Fasern haben auf ihre Erfolgsorgane in der Regel die entgegengesetzte Wirkung, wie die Fasern, die aus dem Brust- und Lendenmark stammen.

Die im Zungennerv verlaufenden Fasern, welche eine Gefäßverengerung in der Speicheldrüse veranlassen, stammen aus dem Brustmark, die in der Chorda tympani verlaufenden Gefäßerweiterer stammen aus dem verlängerten Mark, die Nerven, welche die Tätigkeit des Herzens beschleunigen, stammen aus dem Brustmark, die Nerven, welche den Herzschlag verlangsamen, kommen aus dem verlängerten Mark usf. Man sah sich in Erkenntnis dieser Verhältnisse veranlaßt, daß ganze sympathische Nervensystem in zwei ihrem Ursprung und ihrer Wirkung entsprechende Systeme einzuteilen, das kranialsakral autonome System, welches seine Fasern aus dem Schädelinnern und aus dem Kreuzmark bezieht, und den Grenzstrang des Sympathikus, welcher seine präganglionären Fasern aus dem Brust- und Lendenmark erhält. Die beistehende Tabelle, welche nach dem vorliegenden Versuchsmaterial, insbesondere den Untersuchungen Langleys zusammengestellt ist, kann eine Uebersicht über die Wirksamkeit dieser beiden Systeme geben.

Kranial-sakral autonome Systeme	Grenzstrang des Sympathikus
III. Gehirnnerv (Mittelhirn) Kontraktion des Pupillenverengerers und der Ciliarmuskeln.	Kontraktion des Pupillenerweiterers, der Gefäßmuskeln im Auge.
VII., IX. und X. Gehirnnerv (verlängertes Mark). Hemmung des Herzens und der Blutgefäße und Schleimhäute des Kopfes.	Beschleunigung der Herztätigkeit. Kontraktion der Blutgefäße in den Schleimhäuten des Kopfes.
Erregung und Hemmung der Darmmuskulatur von Speiseröhre bis Dickdarm.	Hemmung und Erregung der Darmmuskulatur von Speiseröhre bis Dickdarm.
Erregung der Sekretion der Magendrüsen und der Leber.	Sekretion der Magendrüsen und Leber.
I., II. und III. Sakralnerv. Erweiterung der Gefäße des Mastdarmes und der äußeren Geschlechtsorgane.	Kontraktion der Gefäße des Mastdarmes und der äußeren Geschlechtsorgane.
Kontraktion der Dickdarmmuskeln und des Mastdarmes.	Erschlaffung und Kontraktion des Dickdarmes und Mastdarmes.
Kontraktion der Harnblase.	Erschlaffung und Kontraktion der Harnblase.
Erschlaffung der Harnröhre.	Kontraktion der Harnröhre.
Erschlaffung der Muskeln der äußeren Geschlechtsorgane.	Kontraktion der Muskeln der äußeren Geschlechtsorgane.

Es ist ferner sehr interessant, daß sich die Nervenenden der beiden Systeme des sympathischen Nervensystems gegenüber bestimmten Giften verschieden verhalten, wie auch Andeutungen vorliegen, welche zeigen, daß auch die im Zentralnervensystem gelegenen Zellen der beiden Systeme auf verschiedene Gifte verschieden reagieren. Wir verdanken die Kenntnis dieser Tatsachen der experimentell-pharmakologischen Forschung, insbesondere die Untersuchungen von H. H. Meyer und seinen Mitarbeitern haben eine Reihe wichtiger, hierhergehörender Tatsachen aufgedeckt.

Pikrotoxin z. B. erregt vorwiegend die im Zentralnervensystem gelegenen Zentren des kranial und sakral autonomen Systems, während Kokain, Atropin, Koffein die Zentren des Grenzstranges erregen.

Von den auf die Erfolgsorgane des sympathischen Nervensystems wirkenden Stoffen ist in erster Linie das aus den Nebennieren stammende Adrenalin bezw. Suprarenin zu nennen. Das Adrenalin erregt alle Nervenenden, welche vom Grenzstrang des Sympathikus stammen, es veranlaßt eine Kontraktion sämtlicher Blutgefäße des Körpers, es beschleunigt den Herzschlag, es ruft eine Erweiterung der Pupille hervor. An Stellen, an welchen die Fasern des Grenzstranges hemmend wirken, wie z. B. am Darm, ruft auch das Adrenalin Hemmung hervor. Dies geht soweit, daß bei Tieren, bei welchen die Reizung des Grenzstranges Verstärkung der Darmbewegung hervorruft, der Nebennierenextrakt gleichfalls eine Verstärkung hervorruft, bei solchen Tieren, bei welchen Reizung des Grenzstranges Hemmung der Darmbewegung ergibt, auch das Adrenalin hemmend wirkt. Auf die Nervenendigungen des kranial-sakral autonomen Systems hat das Adrenalin keine Wirkung. Auf die Nervenenden dieses Systems wirken andere Stoffe. Das Atropin lähmt die Nervenenden, das Muskarin, Pilocarpin, Physostigmin und Cholin erregen die Nervenenden des kranial-sakral autonomen Systems. Atropin veranlaßt Pupillenerweiterung, Muskarin eine Pupillenverengerung, Atropin hebt die Wirkung der Hemmungsnerven des Herzens auf, beschleunigt also den Herzschlag, Muskarin verlangsamt den Herzschlag. Atropin lähmt die Sekretion vieler Drüsen, Muskarin steigert sie. Wir können also Steigerung bezw. Verminderung der Funktion eines vom sympathischen Nervensystem innervierten Organes bekommen, einmal bei Reizung der entgegengesetzt wirkenden Fasern beider Systeme, das andere Mal durch die lähmende bezw. erregende Wirkung verschiedener Gifte auf die Nervenenden des gleichen Systems. Diese Erkenntnis ist für das Verständnis des Zusammenarbeitens beider Systeme von nicht geringer Bedeutung.

Wir wollen nun noch die Frage zu beantworten suchen, welche Beziehung zwischen den Nervenenden des kranial-sakral autonomen Systems und denen des Grenzstranges besteht.

Die Erweiterung der Pupille wird durch einen Muskel bewirkt, der vom Grenzstrang des Sympathikus innerviert wird, die Verengerung der Pupille geschieht durch einen anderen Muskel, der seine Nervenfasern vom kranial-autonomen System bezieht. Hier versorgen die beiden Systeme zwei antagonistische Muskeln. Die Muskeln der Blutgefäße dagegen erhalten von beiden Systemen Fasern. Der Grenzstrang steigert die Kontraktion der Gefäßmuskeln, das autonome System setzt sie herab. Dasselbe gilt vom Darm; die vom Grenzstrang kommenden Fasern steigern, die vom autonomen System kommenden Fasern setzen die Darmtätigkeit herab. Wir haben hier eine Doppelinnervation der Organe vor uns; durch die eine Art von Fasern wird die Tätigkeit der Organe gesteigert, durch die anderen vermindert bezw. gehemmt.

Die gleiche Funktion kommt der Doppelinnervation antagonistischer Zentren im Zentralnervensystem zu. Zu den motorischen Nervenzellen eines Beugemuskels kommen Fasern, welche sie erregen, zu den gleichen motorischen Nervenzellen kommen vom Reflexbögen der antagonistischen Streckmuskeln Fasern, welche sie hemmen. Der Eintritt von Hemmung bezw. Erregung ist von der Reizintensität abhängig. Viele Reflexbögen werden bei Anwendung schwacher Reize gehemmt, bei starker Reizung erregt. Andere Reflexbögen reagieren auf schwache Reizung mit Erregung, auf starke Reizung mit Hemmung. Die gleichen Verhältnisse finden wir beim Studium der antagonistischen Innervation der Krebsscherenmuskel. Die Krebsschere wird von zwei Muskeln bewegt, der eine öffnet, der andere schließt die Schere. Beide Muskeln weisen, wie Biedermann gezeigt hat, eine Doppelinnervation auf, d. h. zu jeder Muskelfaser treten zwei Nervenfasern, deren Verlauf sich bis in das Zentralnervensystem zurückverfolgen läßt. Bei schwacher elektrischer Reizung des Scherennerven wird der Schließmuskel gehemmt, der Oeffnungsmuskel erregt. Bei starker Reizung wird der Schließmuskel erregt, der Oeffnungsmuskel gehemmt. Die Nerven, welche zu beiden Muskeln hinziehen, unterscheiden sich durch ihre Ermüdbarkeit und ihr Sauerstoffbedürfnis, so daß wir sie auch aus diesem Grunde als funktionell ungleichwertig betrachten müssen.

Nach den Erfahrungen an den moto-

rischen Zentren antagonistischer Muskeln und an den Krebsscherenmuskeln müssen wir schließen, daß der Eintritt von Hemmung und Erregung in erster Linie von der Erregungsintensität, dann aber auch von der Häufigkeit der Erregungswellen abhängt. Wenn wir nun das vorliegende Material durchsehen, das über die sympathischen Innervationen vorliegt, so finden wir Beobachtungen, welche sich den am Rückenmark und an den Krebsmuskeln gewonnenen Erfahrungen einfügen und zeigen, daß sich bei Reizung ein und derselben sympathischen Nervenfaser Erregung und Hemmung erziehen läßt, daß der Eintritt von Erregung und Hemmung von der Intensität und der Häufigkeit der Reize abhängt, daß ferner die Fasern beider Systeme funktionelle Verschiedenheiten aufweisen. Carlson hat im Halssympathikus der Katze nicht nur Verengerungsfasern für die Blutgefäße der Unterkieferdrüse, sondern auch Erweiterungsfasern nachgewiesen. A. Fröhlich und O. Löwy haben bei Einwirkung von Amylnitrit in den Fasern der Chorda tympani nicht nur Gefäßerweiterungsfasern, sondern auch Verengerungsfasern festgestellt.

v. Frey hat bei gleichzeitiger Reizung der antagonistisch wirksamen Chorda und Grenzstrangfasern eine höhere Erregbarkeit der letzteren, eine leichtere Ermüdbarkeit der ersteren nachgewiesen.

Die Fasern, welche zum Darm hinziehen, rufen in Abhängigkeit von der Reizintensität Hemmung oder Erregung der Darmtätigkeit hervor.

Für die Wirkung vieler auf das sympathische Nervensystem wirkender Gifte ist der Zustand der Erfolgsorgane entscheidend. Der gedehnte Uterus reagiert auf die gleichen Gifte mit Kontraktion, der kontrahierte Uterus mit Erschlaffung. Alle diese Erfahrungen weisen darauf hin, daß die antagonistischen Fasern des sympathischen Nervensystems an der gleichen Stelle der Erfolgsorgane angreifen, wie man dies an Methylenblaupräparaten der doppelinnervierten Krebsscherenmuskeln direkt sehen kann.

Die antagonistischen Nervenfasern mögen neben Verschiedenheiten in der Erregungsintensität und Erregungsfrequenz noch Verschiedenheiten im zeitlichen Verlauf der Erregungen aufweisen. Sie müssen ferner, wie ihr Verhalten gegenüber Giften zeigt, einen verschiedenen chemischen Aufbau besitzen, welcher bewirkt, daß die Uebergangsstellen beider Faserarten zum gleichen Muskel sich verschieden verhalten. Gerade diese Uebergangsstelle oder Synapse und reizaufnehmende Substanz spielt beim Zustandekommen von Erregung und Hemmung eine überaus wichtige Rolle; sie ist der „gemeinsame Angriffsort" für die von den Nervenfasern beider Systeme kommenden Erregungen und die Reize, welche ihr durch das Blut zugeführt werden.

3. Die durch das sympathische Nervensystem vermittelten Reflexe. Die Reflexe, welche durch das sympathische Nervensystem vermittelt werden, zeigen in gewissen Punkten Uebereinstimmung mit den durch das übrige Nervensystem vermittelten Vorgängen, sie zeigen jedoch auch bestimmte Verschiedenheiten, welche mit der besonderen Anordnung und Funktion der Zellelemente im Reflexbogen des sympathischen Nervensystems zusammenhängen.

Die Abhängigkeit der Reflexvorgänge von der Reizintensität und der Reizdauer sind insbesondere im Gebiete der Verdauungsdrüsen studiert. In erster Linie waren es die wichtigen Arbeiten Pawlows und seiner Mitarbeiter, welche unsere Kenntnisse von den sympathischen Innervationen außerordentlich erweitert haben. Man kann die Ausführungsgänge vieler Drüsen nach außen leiten und die Wirkung verschiedenartiger Reize auf die Drüsenfunktion studieren. Die Verdauungsdrüsen werden vorzugsweise durch mechanische und chemische Reize in Erregung versetzt, welche auf die sensiblen Nerven jener Schleimhäute wirken, in welche die Ausführungsgänge der Drüsen einmünden. Der mechanische Reiz, wie er durch kleine, in den Mund eingeführte Steinchen auf die Schleimhaut des Mundes ausgeübt wird, ruft nur die Sekretion einer geringen Menge wässerigen Speichels hervor. Die chemischen Reize, namentlich die, welche durch die gewohnte Nahrung geliefert werden, rufen eine starke Speichelsekretion hervor, deren Intensität abhängig ist von der Menge der zugeführten Nahrung, bezw. ihrer Konzentration. Große Mengen trockenen Brotes lösen eine stärkere Speichelsekretion aus, als die gleiche Menge Brot, die schon in Wasser aufgeweicht ist. Eine stärker konzentrierte Säure löst eine stärkere und längere dauernde Sekretion aus als dieselbe Säure in schwächerer Konzentration. Die Speichelsekretion wird auch durch die Qualität des Reizes beherrscht. Im Speichel findet sich ein Ferment, das Ptyalin, daß die komplizierter gebauten Kohlenhydrate, wie z. B. die Stärke in einfache und leicht resorbierbare Kohlenhydrate zerlegt. Wird eine stärkehaltige Nahrung gereicht, so ist der Speichel reicher an Fermenten als bei Verabreichung einer gleichen Menge Fleischnahrung.

So sehen wir die Reflexe des sympathischen Nervensystems in feinster Weise von der Intensität, Qualität und Dauer der Reize abhängen.

Einzelne Gebiete des sympathischen

Nervensystems befinden sich andauernd in einer tonischen Erregung. Dies ist besonders bei den Reflexbögen der Fall, welche das Herz und die Blutgefäße innervieren. Im verlängerten Mark befindet sich ein nervöses Sammelzentrum, welches die Tätigkeit des Herzens und sämtlicher Blutgefäße reguliert, es wird als Gefäßzentrum bezeichnet. Wir haben in dem Nervus depressor einen sensiblen Nerven kennen gelernt, welcher ausschließlich mit dem Gefäßzentrum im verlängerten Mark in Verbindung steht und dessen Tätigkeit andauernd beherrscht. Wird bei einem Tier das verlängerte Mark zerstört, so läßt der Tonus sämtlicher Gefäße nach, der Blutdruck zeigt eine bedeutende Erniedrigung. Aber auch durch das Rückenmark kann ein schwacher Gefäßtonus aufrecht erhalten werden, denn hat sich nach Zerstörung des Gefäßzentrums ein bestimmter Blutdruck wieder hergestellt, so ruft Zerstörung des Rückenmarks eine neue Blutdrucksenkung herbei.

Eine wichtige Frage ist nun die, ob die im Rückenmark und im verlängerten Mark gelegenen Gefäßzentren die einzelnen Gefäßgebiete des Körpers zu antagonistischer Aktion anregen können. Während der Verdauung sind die Blutgefäße der Eingeweide mächtig erweitert, die des Kopfes verengert, bei der Muskelarbeit erweitern sich die Gefäße der Muskeln. Kommt diese Verschiebung der Blutmassen nach den Stellen stärkster Inanspruchnahme auf rein physikalischer Grundlage zustande oder spielen hierbei antagonistische Innervationen mit, wie wir sie von der Innervation antagonistischer Skelettmuskeln her kennen? Werden z. B. die Beugemuskeln eines Gelenkes erregt, so werden gleichzeitig die Streckmuskeln desselben Gelenkes gehemmt und erschlaffen. Derselbe Mechanismus könnte die Verschiebung der Blutmassen beherrschen. Vorderhand haben wir jedoch für eine derartige Annahme keinen Anhaltspunkt. Die Versuchsergebnisse, welche vorliegen, sprechen mehr für eine physikalische Grundlage dieser Erscheinungen. Bayliss hat z. B. folgenden Versuch beschrieben. Bei Erstickung eines Tieres verengern sich die Eingeweidegefäße, während die Hautgefäße sich erweitern. Um festzustellen, ob die Erweiterung der Hautgefäße rein passiv durch die Drucksteigerung in den Eingeweidegefäßen erfolgt, band Bayliss in die Halsschlagader des Tieres ein Rohr ein, das so tief in eine mit Quecksilber gefüllte Wanne eintauchte, daß der vorhandene Blutdruck nicht genügte, Blut aus der Ader herauszutreiben. Während der Erstickung verengerten sich die Eingeweidegefäße, der Blutdruck konnte jedoch nicht ansteigen, da jetzt Blut aus dem offenen Rohr entwich; die Folge davon war, daß sich die Hautgefäße nicht nur nicht erweiterten, sondern sogar verengerten.

Nach den ausgedehnten Versuchen Webers ist es sicher, daß einzelne Gefäßgebiete isoliert innerviert werden können, so kann es z. B. zu einer isolierten Erweiterung der Gefäße in einem Arm kommen durch Miterregung der sympathischen Reflexbogen von dem willkürlich beeinflußbaren Reflexbogen der Armmuskeln aus. Diese Miterregung ist es offenbar, welche das Zusammenarbeiten der verschiedenen, vom sympathischen Nervensystem innervierten Organe, z. B. der Gefäßgebiete beherrscht.

Wenn wir nun die vorliegenden Erfahrungen über die Funktion des sympathischen Nervensystems zusammenfassen, so finden wir, daß sich seine Elemente wohl den allgemeinen Erfahrungen über die Funktion der Nervenzellen einfügen, daß sich jedoch das sympathische Nervensystem durch eine Reihe von Besonderheiten vom übrigen Nervensystem unterscheidet, die im folgenden angeführt seien.

1. Die sensible Innervation der vom sympathischen Nervensystem innervierten Organe ist nur wenig entwickelt, außerdem kommt uns die Erregung der sensiblen Nerven dieser Organe nicht zum Bewußtsein.

2. Die Zellelemente, welche die Reflexbogen des sympathischen Nervensystems zusammensetzen, weisen eine Anordnung auf, welche eine gleichzeitige Ausbreitung ihrer Erregungen auf eine große Anzahl von Zellen der von ihnen innervierten Organe ermöglicht.

3. Die sympathischen Ganglien weisen keine der für das Zentralnervensystem charakteristischen Eigenschaften auf, ein Umstand, welcher gleichfalls darauf hinweist, daß den sympathischen Ganglien keine andere Funktion zukommt, als die der gleichzeitigen Innervation vieler Organzellen.

4. Die Reflexbögen des sympathischen Nervensystems haben vielfach die gleichen sensiblen Nerven, wie die Reflexbögen des übrigen Nervensystems. Dadurch kommt es bei willkürlicher oder reflektorischer Innervation eines Skelettmuskels zur Miterregung seiner Blutgefäße.

Literatur. ***Langley,*** *Das sympathische Nervensystem. Ergebnisse der Physiologie, Bd. 2, S. 818, 1903.* — ***P. Schultz,*** *Das sympathische Nervensystem. Nagels Handbuch der Physiologie, Bd. 4, S. [illegible], 1909.* — ***H. H. Meyer und Gottlieb,*** *Die experimentelle Pharmakologie. Berlin 1910.* — ***Müllert,*** *Ueber elektrische Reizung des Halssympathikus. Pflügers Archiv, Bd. 55, S. 550, 1894.* — ***W. Kühne,*** *Ueber das doppelsinnige Leitungsvermögen der Nerven*

Zeitschrift für Biologie, Bd. 22, S. 305, 1886. — **E. Hering.** *Beiträge zur allgemeinen Nerven- und Muskelphysiologie. IX. Sitzungsbericht der k. k. Akademie der Wissenschaften zu Wien.* — **O. Langendorff.** *Die Beziehungen der Nervenfasern des Halssympathikus zu den Ganglienzellen des oberen Halsknoten. Zentralblatt für Physiologie, Bd. 5, S. 129, 1891.* — **A. J. Carlson.** *Vasodilator fibres to the submaxilary gland in the cervical sympathic of the cat. Amer. Journ. of Physiology. Vol. XIX, 1907, p. 508.* — **P. Schultz,** *Zur Physiologie der sympathischen Ganglien. Archiv für Physiologie 1891, p. 124.* — **E. Weber.** *Der Einfluß psychischer Vorgänge auf den Körper, insbesondere auf die Blutverteilung. Berlin 1910.* — **F. W. Fröhlich,** *Das Prinzip der scheinbaren Erregbarkeitssteigerung. Zeitschrift für allgemeine Physiologie, Bd. 9, S. 1, 1909.* — **Derselbe.** *Die Analyse der an der Krebsschere auftretenden Hemmungen. Zeitschrift für allgemeine Physiologie, Bd. 7, S. 393, 1907.* — **A. Fröhlich und O. Loewi,** *Ueber vasokonstriktorische Fasern in der Chorda tympani. Archiv für experiment. Pathol. und Pharmakologie, Bd. 59, S. 64, 1908.*

F. W. Fröhlich.

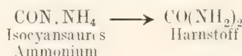
Synklinale.

Bei Schichtenbiegungen bezeichnet man die Umbiegung in der Mulde als Synklinale, im Sattel als Antiklinale. Vgl. den Artikel „Schichtenbau".

Synthese.

1. Erläuterung des Begriffes. Bedeutung. 2. Synthese einfacher organischer Verbindungen, insbesondere auf pyrogenem und elektrochemischem Wege. 3. Synthesen durch Polymerisation. 4. Synthesen durch Anwendung von Organomagnesiumverbindungen. 5. Synthesen mit Acetessigester und verwandten Verbindungen. 6. Synthesen von Polypeptiden. 7. Asymmetrische Synthese. 8. Synthesen mittels Aluminiumchlorids. 9. Synthesen durch Kondensation von Säuren mit Aldehyden. Perkinsche Reaktion. 10. Synthesen von Farbstoffen. 11. Synthesen von Alkaloiden und verwandten Verbindungen. 12. Synthese von Arzneimitteln.

I. Erläuterung des Begriffes, Bedeutung. Der Begriff Synthese hat in der Chemie im Laufe der Jahre verschiedene Deutung erfahren. Längere Zeit verstand man darunter einzig und allein die Darstellung natürlich vorkommender Substanzen auf künstlichem Wege. Diese Fassung des Begriffes erschöpft das Wesen desselben nur zu einem geringen Teil. Man versteht gegenwärtig unter Synthese im engeren Sinne den Aufbau einer Verbindung aus den Elementen oder aus solchen Verbindungen, welche ihrerseits aus den Elementen gewonnen werden können. Als Beispiel sei angeführt die Bildung von Cyanwasserstoff HCN beim Ueberspringen des Induktionsfunkens zwischen Kohlenspitzen in einer Stickstoffatmosphäre. Im weiteren Sinne gebraucht man den Begriff Synthese für die Darstellung komplizierter Substanzen aus einfacheren oder sogar für die Gesamtheit der künstlichen Darstellungsmethoden der Verbindungen. Im nachfolgenden schließen wir uns der letzteren Auffassung an. Die Synthese steht also dem Abbau, noch umfassender ausgedrückt der Analyse gegenüber, welche die Zerlegung der Stoffe in ihre Bestandteile bezweckt. In den ersten frühesten Perioden der chemischen Wissenschaft, so lange man sich nur mit der Untersuchung mineralischer Verbindungen abgab, bildete sich vorzugsweise die analytische Richtung aus. Der wahre Wert, den die Synthese für die chemische Wissenschaft hat, wurde erst später erkannt, als man die von der belebten Natur erzeugten Produkte in den Kreis der Beobachtungen zog. Noch in den ersten Dezennien des 19. Jahrhunderts war man der Ansicht, daß die vielen Kohlenstoffverbindungen, welche im Tier- und Pflanzenkörper vorkommen, lediglich in den Organismen unter der Mitwirkung einer geheimnisvollen Kraft, der sogenannten Lebenskraft, entstehen und nicht künstlich auf chemischem Wege erzeugt werden könnten. Dieser Ansicht fehlte es zunächst auch nicht an experimenteller Begründung, insofern als die in damaliger Zeit angestellten Versuche, die in Frage kommenden Stoffe aus Materialien aufzubauen, welche nicht selbst in Organismen vorkommen, scheiterten. Durch die epochemachende Darstellung eines in der Natur nur von Organismen produzierten Körpers, des Harnstoffs CON_2H_4, aus als organisch betrachteten Bestandteilen (Cyansäure und Ammoniak), die Wöhler im Jahre 1828 gelang,

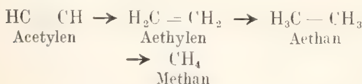


wurde die Lehre von der Lebenskraft stark erschüttert. Aber noch 1837 war Berzelius von der Berechtigung derselben vollständig überzeugt, und nur sehr langsam, in dem Maße als die synthetische Chemie ihren Aufschwung nahm, verschwand der Begriff der Lebenskraft aus der Chemie. Erst um die Mitte des 19. Jahrhunderts setzt die zielbewußte Pflege der Synthese in der organischen Chemie ein. Von da ab ging dann die Entwickelung außerordentlich rasch voran, und es wurden Er-

gebnisse errungen, welche sowohl für die Wissenschaft als auch für die Industrie von den weitgehendsten Folgen waren.

Die anorganische Synthese, welcher große Einfachheit zukommt, wird im folgenden nicht berücksichtigt. Es soll ein Ueberblick nur über die synthetischen Methoden der organischen Chemie gegeben werden unter besonderer Berücksichtigung von praktisch wichtigen oder von theoretisch interessanten Erfolgen, welche in der Neuzeit errungen wurden.

2. Synthese einfacher organischer Verbindungen, insbesondere auf pyrogenem und elektrochemischem Wege. Sehr einfache organische Substanzen sind die Kohlenwasserstoffe, die Stammsubstanzen aller Kohlenstoffverbindungen. 1863 ist es Berthelot gelungen, freien Kohlenstoff und freien Wasserstoff direkt miteinander zu vereinigen; er zeigte, daß diese beiden Elemente unter dem Einfluße des elektrischen Funkens sich unmittelbar zu Acetylen C_2H_2 verbinden. In weniger direkter Weise läßt sich der gleiche Kohlenwasserstoff aus den Elementen erzeugen, wenn man ein Gemenge von Wasserstoff mit Kohlenoxyd oder mit Schwefelkohlenstoff der Einwirkung des elektrischen Funkens aussetzt. Das Acetylen kann nun als Ausgangspunkt für zahlreiche weitere Kohlenwasserstoffsynthesen dienen. Durch Wasserstoffanlagerung wird es in Aethylen, Aethan und schließlich in Methan übergeführt,

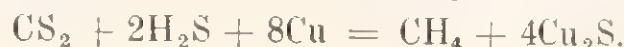


$$HC \equiv CH \rightarrow H_2C = CH_2 \rightarrow H_3C - CH_3 \rightarrow CH_4$$

Acetylen, Aethylen, Aethan, Methan

Durch pyrogene Reaktionen, d. h. starkes Erhitzen in geeigneten Apparaten, lassen sich aus Acetylen, wie zuerst Berthelot und in jüngster Zeit R. Meyer nachgewiesen hat, zahlreiche Kohlenwasserstoffe der aliphatischen und der aromatischen Reihe gewinnen, nämlich Methan CH_4, Benzol C_6H_6, Toluol $C_6H_5.CH_3$, Naphtalin $C_{10}H_8$, Inden C_9H_8, Biphenyl $C_{12}H_{10}$, Fluoren $C_{13}H_{10}$, Anthracen $C_{14}H_{10}$, Pyren $C_{16}H_{10}$ und Chrysen $C_{18}H_{18}$. Das ist nicht ohne praktisches Interesse, denn diese Acetylen-Kondensationen dürften als eine wesentliche, wenn auch nicht als einzige Quelle der Benzolkörper im Gasteer anzusehen sein.

Berthelot hat noch andere Verfahren zum Aufbau von Kohlenwasserstoffen aus den Elementen angegeben. Zum Beispiel wies er nach, daß sich beim Ueberleiten eines Gemenges von Schwefelkohlenstoff mit Schwefelwasserstoff über erhitztes Kupfer Sumpfgas und nebenbei Aethylen bildet:



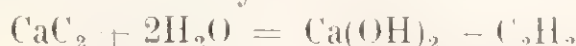
$$CS_2 + 2H_2S + 8Cu = CH_4 + 4Cu_2S.$$

In neuerer Zeit wurde die elektrische Energie in verschiedenen Fällen zum Aufbau einfacher organischer Verbindungen benutzt. Man gewann durch Erhitzen von ungelöschtem Kalk mit Kohle im elektrischen Ofen das technisch so wichtige Calciumcarbid,



$$CaO + 3C = CaC_2 + CO.$$

Moissan erhielt auf ähnlichem Wege eine große Menge anderer Metallverbindungen des Kohlenstoffs. Die Mehrzahl dieser Carbide setzen sich mit Wasser unter Bildung von Kohlenwasserstoffen um. Die Carbide der Alkali- und Erdalkalimatelle geben dabei Acethylen:



$$CaC_2 + 2H_2O = Ca(OH)_2 + C_2H_2$$

die des Aluminiums (Al_4C_3) oder Berylliums (Be_4C_3) liefern Methan, die vieler anderer Metalle, wie Cer, Lanthan, Uran, neben Methan und Acetylen noch flüssige und feste Kohlenwasserstoffe. — Calciumcyanamid $CaCN_2$ kann durch Glühen eines Gemisches von Kalk und Kohle in einer Stickstoffatmosphäre im elektrischen Ofen dargestellt werden,



$$CaO + 2C + 2N = CaCN_2 + CO.$$

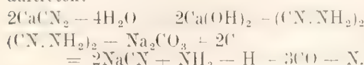
Das so erhaltene Produkt heißt Kalkstickstoff und findet, da es sich bei der Einwirkung von Wasser unter schließlicher Bildung von Ammoniak zersetzt, Verwendung als künstliches Düngemittel:



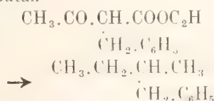
$$CaCN_2 + 3H_2O = CaCO_3 + 2NH_3.$$

Man kann also unter Vermittelung des Kalkstickstoffs Ammoniak aus dem Stickstoff der Luft darstellen, was Bedeutung für die Landwirtschaft hat. Der Kalkstickstoff hat außerdem noch die Eigenschaft, daß er als Unkrautvertilger angewendet werden kann, insbesondere bei rauhblättrigen Pflanzen. Durch die Entdeckung des Kalkstickstoffs von Frank und Caro wurde also ein Weg gezeigt, wie der für die Landwirtschaft so wichtige Stickstoffdünger in einer billigen Form im Inlande erzeugt werden kann. Die große volkswirtschaftliche Bedeutung dieser Erfindung läßt sich schon erkennen aus dem Hinweis, daß die Einfuhr von Chilesalpeter nach Europa im Jahre 1909/10 1732000 t betrug und noch im Steigen begriffen ist. Es entspricht das ungefähr einem Werte von 350000000 Mark. Der deutsche Konsum beträgt rund 180000000 Mark pro Jahr. Nunmehr kann ein bedeutender Teil des jährlich steigenden Mehrbedarfs an Chilesalpeter nach und nach durch Kalkstickstoff ersetzt werden. Auch ist es möglich, aus dem Kalkstickstoff Cyanalkalien zu erhalten, welche für die Goldgewinnung wichtig sind. Zu dem Zweck wird derselbe mit Wasser gekocht, wobei sich Dicyandiamid bildet. Letzteres geht beim Schmelzen mit

Soda oder Pottasche in Cyanalkali über, wobei nebenher Ammoniak und Melamin auftreten:



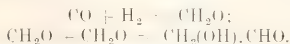
J. Tafel hat festgestellt, daß die elektrolytische Reduktion von Acetessigestern Kohlenwasserstoffe liefert und dadurch die so ungewöhnlich fruchtbare Acetessigestersynthese auf einfachstem Wege der Gewinnung von Kohlenwasserstoffen dienstbar gemacht. So z. B. entsteht bei der elektrolytischen Reduktion von Benzylacetessigester neben anderen Stoffen 2-Benzyl-butan



Auch elektrische Energie in Form dunkler Entladungen kann synthetische Vorgänge bewirken, wie die schon lange bekannten, von Berthelot aufgefundenen Tatsachen beweisen. So z. B. fanden Losanitsch und Jovitschitsch, daß sich im Elektrisator Kohlenoxyd und Wasser oder Kohlendioxyd und Wasserstoff direkt zu Ameisensäure vereinigen:

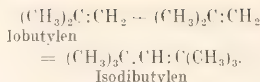


Aus Kohlenoxyd und Wasserstoff entsteht zunächst Formaldehyd, der sich rasch polymerisiert.

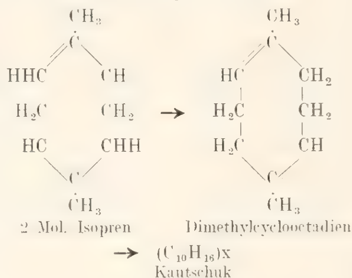


Es läßt sich also auf diese Weise der Aufbau der Ameisensäure und des Formaldehyds aus den Elementen bewerkstelligen.

3. Synthesen durch Polymerisation. Man versteht unter Polymerisation die Verkettung zweier oder mehrerer Moleküle eines Körpers zu neuen Verbindungen, aus welchen die ursprüngliche Substanz häufig wieder regeneriert werden kann. Die Alkylene vervielfältigen ihr Molekulargewicht schon bei gewöhnlicher Temperatur, wenn sie der Einwirkung gewisser Kondensationsmittel, wie Chlorzink, konz. Schwefelsäure usw. ausgesetzt werden. Das Aethylen $H_2C{:}CH_2$ selbst läßt sich bei Anwendung dieser Mittel nicht polymerisieren; für seine Homologen ist der Polymerisationsvorgang hauptsächlich beim Isobutylen und Amylen untersucht worden. Von den Polymerisationsprodukten, in welche das Isobutylen durch Berührung mit kondensierenden Mitteln wie Schwefelsäure und Chlorzink übergeführt wird, und die sich daher auch häufig statt seiner bei Reaktionen direkt bilden, sind das Isodibutylen C_8H_{16} und Isotributylen $C_{12}H_{24}$ zu nennen.



Das Amylen C_5H_{10} polymerisiert sich sehr leicht zu Diamylen $C_{10}H_{20}$ und Triamylen $C_{15}H_{30}$. Von großer praktischer Bedeutung ist die Polymerisation, welche Isopren oder β-Methyl-butadien (β-Methyl-divinyl) langsam beim Aufbewahren in Gegenwart von Säurespuren oder im Licht, rasch beim Erhitzen mit Eisessig im geschlossenen Rohr erleidet. Es entsteht ein Produkt, welches nichts anderes als Kautschuk ist. Die Reaktion ist so zu deuten, daß das Isopren zunächst in Dimethylcyclooctadien übergeht durch Kondensation an den Kohlenstoffatomen in 1,4-Stellung und daß dieses sich weiter zu Kautschuk polymerisiert.

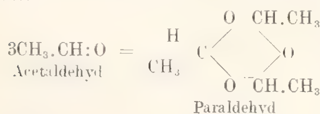


Es hat sich gezeigt, daß viele derjenigen Kohlenwasserstoffe, die dem Isopren in ihrer Konstitution nahe stehen und eine konjugierte Doppelbindung besitzen, in gleicher Weise in kautschukartige Produkte, sogenannte Homologenkautschuke, umgewandelt werden können. Ganz allgemein lassen sich also die Kohlenwasserstoffe der Butadienreihe in Kautschukarten überführen. Bei der hohen Bedeutung, die das Isopren als Ausgangsmaterial für die Bereitung von künstlichem Kautschuk besitzt, war es notwendig Methoden auszuarbeiten, welche eine technische Verwertung günstig erscheinen ließen. Bei einem so großen technischen Problem, wie es die künstliche Darstellung von Kautschuk ist, muß man von vornherein darauf bedacht sein Ausgangsmaterialien zu wählen, die äußerst billig und in hinreichender Menge jederzeit vorhanden sind. Den Steinkohlenteer als Ausgangsmaterial hat Fritz Hofmann (Elberfelder Farbenfabriken) zur technischen Darstellung des Isoprens benutzt. C. Harries ging bei seinen Versuchen vom Alkohol bezw. der Stärke aus, da er das Ziel verfolgte, die von der Landwirtschaft produzierten Rohstoffe für die technische Erzeugung des Kaut-

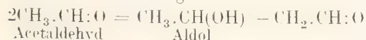
schuks zu benützen. Auch seine Bemühungen waren erfolgreich. Auch Terpentinöl kann in Isopren übergeführt werden, z. B. wenn man seine Dämpfe über glühende Metallspiralen leitet.

Aehnlich wie die Alkylene lassen sich auch die **Acetylene** zu Verbindungen mit grösseren Molekülen kondensieren. So werden sie von konzentrierter Schwefelsäure unter Bildung von aromatischen Kohlenwasserstoffen absorbiert. Aus **Allylen** $CH_3C \equiv CH$ entsteht dabei **Mesitylen** $C_6H_3(CH_3)_3$, aus **Crotonylen** $CH_3C \equiv CCH_3$ das **Hexamethylbenzol** $C_6(CH_3)_6$.

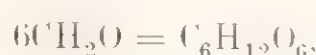
Von sonstigen Körperklassen sind noch die **Aldehyde** hervorzuheben, welche eine besondere Neigung besitzen, sich zu polymerisieren; auch hier treten mehrere Moleküle zusammen und bilden eine Verbindung, welche die gleiche Zusammensetzung, aber ein höheres Molekulargewicht als der Aldehyd besitzt. Es kann dies auf verschiedene Art geschehen. a) Zusammentritt dreier Aldehydmoleküle durch **Sauerstoffbindung** zu trimolekularen Produkten, den sogenannten „**Paraldehyden**", denen man zyklische Struktur zuschreibt. Versetzt man z. B. Acetaldehyd, der eine bei 22° siedende Flüssigkeit ist, mit konzentrierter Schwefelsäure, so findet unter lebhafter Erwärmung, die sich durch Aufsieden des Aldehyds zu erkennen gibt, Kondensation zum Paraldehyd statt:



b) Eine ganz andersartige Polymerisation erleiden Aldehyde unter dem Einfluß von wenig verdünntem Alkali. Es erfolgt Zusammentritt zweier Aldehydmoleküle durch **Kohlenstoffbindung**:


$$2CH_3.CH:O = CH_3.CH(OH)-CH_2.CH:O$$
Acetaldehyd — Aldol

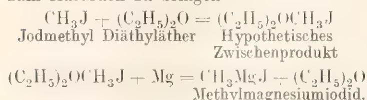
Dieser Vorgang — die **Aldolkondensation** — besitzt ein besonderes Interesse im Hinblick auf die Frage nach den biologischen Vorgängen bei der Kohlensäureassimilation. Die Pflanze nimmt aus der Atmosphäre den Kohlenstoff in Gestalt von Kohlensäure auf, reduziert letztere unter der Mitwirkung des Sonnenlichtes in den chlorophyllhaltigen Teilen und bildet durch eine allmählich fortschreitende Synthese die komplizierten Kohlenstoffverbindungen (Zucker, Stärke, Cellulose) ihres Körpers. Nach **Baeyer** ist es nun der Formaldehyd CH_2O, der zunächst in den grünen Pflanzenteilen durch Reduktion des Kohlendioxyds CO_2 gebildet wird; aus ihm entstehen dann die Zuckerarten durch einen Polymerisationsprozeß,


$$6CH_2O = C_6H_{12}O_6,$$

der sich unter dem Einfluß des Zelleninhaltes abspielt. Tatsächlich wurde in neuerer Zeit das Auftreten von Formaldehyd und anderen Aldehyden in den grünen Pflanzenteilen nachgewiesen. Ferner wird die Annahme **Baeyers** gestützt, durch die Tatsache, daß es möglich ist, in Laboratoriumsprozessen die beiden von ihr vorausgesetzten Phasen, nämlich die Reduktion von Kohlendioxyd zu Formaldehyd und die Polymerisation von Formaldehyd zu Zucker zu verwirklichen.

4. Synthesen durch Anwendung von Organomagnesiumverbindungen. Ihr eigenstes Gepräge hat die synthetisch-organische Chemie der Neuzeit erhalten durch vielseitige Anwendung der Organomagnesiumhaloide. Bis vor wenigen Jahren benützte man von Organometallen für synthetische Zwecke nur die Alkylverbindungen des Zinks und des Quecksilbers sowie die Natrium- und Kupferverbindungen der Acetylene. Insbesondere dienten die von **Frankland** bei Einwirkung von Jodalkylen auf Zink im Jahre 1849 erhaltenen **Zinkalkyle** ZnR_2 zur synthetischen Darstellung von primären, sekundären, tertiären Alkoholen, Ketonen und Oxysäuren. Die den Zinkalkylen entsprechenden, von **Lothar Meyer** studierten **Magnesiumalkyle**, wie z. B. $Mg(CH_3)_2$, sind ebenfalls sehr reaktionsfähig, doch ist das Arbeiten mit ihnen wegen ihrer Unlöslichkeit in den gewöhnlichen Lösungsmitteln, Nichtflüchtigkeit und Unschmelzbarkeit sehr unbequem. Erst in neuerer Zeit, als sich herausgestellt hatte, daß man die freien Magnesiumalkyle durch die meist leicht löslichen primären Einwirkungsprodukte von Halogenalkylen auf Magnesium von der Formel Alkyl.Mg.Halogen (im folgenden abgekürzt R.Mg.Hal) ersetzen kann, sind magnesiumorganische Verbindungen vielfach mit glänzendem Erfolg zu Synthesen verwertet worden. **V. Grignard** zeigte in einer Reihe von Abhandlungen, daß Magnesium und zahlreiche organische Haloidverbindungen, besonders leicht Alkyljodid resp. -bromid, in Gegenwart von trockenem Aether miteinander reagieren und Verbindungen von der allgemeinen Formel R.Mg.Hal bilden. Sie lösen sich im Aether und unterscheiden sich von den Zinkalkylen vorteilhaft dadurch, daß sie sich nicht wie diese an der Luft entzünden. Die Reaktion zwischen organischen Haloidverbindungen und Magnesium in ätherischer Lösung — der Aether spielt wohl die Rolle eines Katalysators — bezeichnet man seitdem kurzweg als die **Grignardsche Reaktion** und die Verbindungen von der allge-

meinen Formel R.Mg.Hal als gemischte magnesiumorganische Verbindungen. Die Bildung des Methylmagnesiumjodids z. B. ist durch die beiden folgenden Gleichungen zum Ausdruck zu bringen

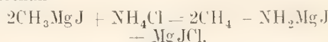


$$CH_3J + (C_2H_5)_2O = (C_2H_5)_2OCH_3J$$
Jodmethyl Diäthyläther Hypothetisches Zwischenprodukt

$$(C_2H_5)_2OCH_3J + Mg = CH_3MgJ + (C_2H_5)_2O$$
Methylmagnesiumjodid.

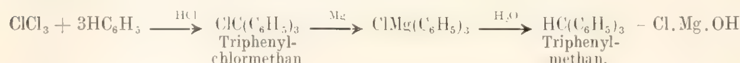
Man kann jetzt eine außerordentlich große Anzahl von organischen Substanzen mit Hilfe der gemischten magnesiumorganischen Verbindungen R.Mg.Hal darstellen und die letzteren haben somit für die Synthese eine Bedeutung erlangt, mit der sich diejenige anderer Verbindungsklassen kaum vergleichen läßt. Man hat durch ihre Anwendung Synthesen durchgeführt von Kohlenwasserstoffen, primären, sekundären und tertiären Alkoholen, Aethern, Ketonen, Aldehyden, Karbonsäuren und Thiokarbonsäuren, Phenolen und Thiophenolen, verschiedenen N-haltigen Verbindungen, sowie von anderen Alkylmetallverbindungen und sie haben für manche Zwecke auch industrielle Verwendung gefunden. Nachfolgende Beispiele mögen das eben Angeführte illustrieren.

a) Die Organomagnesiumhaloide reagieren mit Wasser, Alkoholen, Ammoniak bezw. primären und sekundären Aminen sowie mit Halogenalkylen unter Ersatz des Magnesiums durch Wasserstoff und Bildung von Kohlenwasserstoffen C_nH_{2n+2}; die Umsetzung mit Ammoniumchlorid ist eine sehr gute allgemeine Darstellungsweise von gesättigten Kohlenwasserstoffen wie Methan



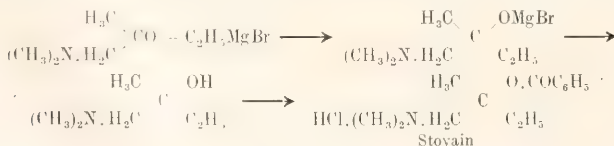
$$2CH_3MgJ + NH_4Cl = 2CH_4 + NH_2MgJ + MgJCl.$$

Das Triphenylmethan, die Muttersubstanz der Triphenylmethangruppe, in die wichtige Farbstoffe wie Fuchsin gehören, entsteht aus der Magnesiumverbindung des Triphenylchlormethans beim Zersetzen mit Wasser und Säure. Es ist das die vorteilhafteste Methode zur Darstellung des Kohlenwasserstoffs, da sich Triphenylchlormethan leicht nach der Friedel-Craftsschen Synthese durch Behandlung von Kohlenstofftetrachlorid mit Benzol und Aluminiumchlorid erhalten läßt.



$$CCl_4 + 3HC_6H_5 \xrightarrow{HCl} ClC(C_6H_5)_3 \xrightarrow{Mg} ClMgC(C_6H_5)_3 \xrightarrow{H_2O} HC(C_6H_5)_3 + Cl.Mg.OH$$
Triphenylchlormethan — Triphenylmethan.

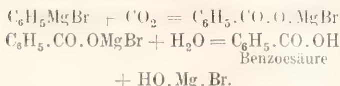
b) Organomagnesiumverbindungen setzen sich mit Ameisensäureester um unter Bildung sekundärer Alkohole, mit allen anderen Estern sowie mit Ketonen erzeugen sie tertiäre Alkohole. Manche der gebildeten tertiären Alkohole sind sehr unbeständig und gehen spontan oder unter gewissen Reaktionsbedingungen in ungesättigte Kohlenwasserstoffe über. Wegen ihrer praktischen Bedeutung sei hier der Synthese von Verbindungen gedacht, welche als Abkömmlinge von Aminoalkoholen aufzufassen sind und als wichtige Ersatzmittel des Kokains dienen. Von ihnen ist hervorzuheben das Stovain, das Chlorhydrat vom Benzoesäureester des Dimethylaminodimethyläthylkarbinols. Fourneau erhielt es durch Benzoylierung des entsprechenden Alkohols, welcher durch Einwirkung von Aethylmagnesiumbromid auf Dimethylaminoaceton entsteht:



$$\begin{matrix}H_3C\\(CH_3)_2N.H_2C\end{matrix}\!\!>CO + C_2H_5MgBr \longrightarrow \begin{matrix}H_3C\\(CH_3)_2N.H_2C\end{matrix}\!\!>C<\!\!\begin{matrix}OMgBr\\C_2H_5\end{matrix} \longrightarrow$$

$$\begin{matrix}H_3C\\(CH_3)_2N.H_2C\end{matrix}\!\!>C<\!\!\begin{matrix}OH\\C_2H_5\end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix}H_3C\\HCl.(CH_3)_2N.H_2C\end{matrix}\!\!>C<\!\!\begin{matrix}O.COC_6H_5\\C_2H_5\end{matrix}$$
Stovain

c) Karbonsäuren sind nach Grignard außerordentlich leicht synthetisch zu erhalten durch Einwirkung von Kohlendioxyd auf die Organomagnesiumsalze und Zersetzen der entstehenden Produkte mit verdünnter Schwefelsäure:



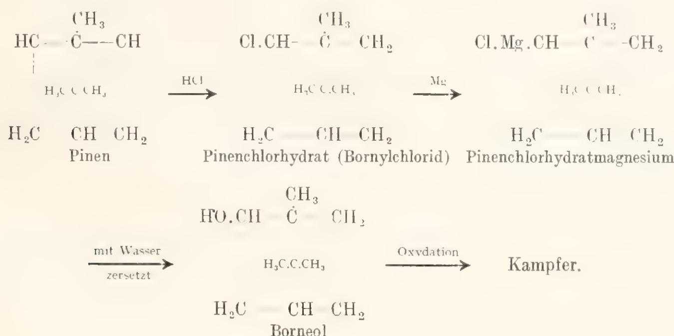
$$C_6H_5MgBr + CO_2 = C_6H_5.CO.O.MgBr$$
$$C_6H_5.CO.OMgBr + H_2O = C_6H_5.CO.OH + HO.Mg.Br.$$
Benzoesäure

Zelinsky glaubt, mit Hilfe dieser Reaktion Erdölkohlenwasserstoffe in industrielle Fette, auch technisch, verwandeln zu können. Das von ihm angegebene Verfahren zur Gewinnung von organischen Säuren insbesondere Fettsäuren aus Rohnaphta besteht darin, daß man die verschiedenen Fraktionen desselben durch Einwirkung von Chlor zunächst in Chlorverbindungen verwandelt. Diese werden, gelöst in wasserfreiem Aether, mit Magnesium behandelt, die resultierenden

Magnesiumverbindungen werden mittels Kohlendioxyd in Karbonsäuren übergeführt. Manche derselben liefern beim Erhitzen mit Glyzerin die entsprechenden Glyzeride mit äußeren Eigenschaften der Fette.

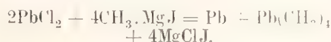
d) Eine allgemeine Bildungsweise der Phenole besteht nach Bodroux darin, daß man durch die ätherische Lösung der Organomagnesiumverbindungen langsam trocknen Sauerstoff oder Luft leitet, darauf mit verdünnter Salzsäure versetzt und dem Reaktionsprodukt das gebildete Phenol durch Kalilauge entzieht. Man erhält auf diese Weise aus dem Chlorcyclohoxan das Hexahydrophenol $C_6H_{11}(OH)$.

e) Mit vielem Erfolg sind die Organomagnesiumsalze in den letzten Jahren auch zu Synthesen von Terpenen, Kampfern und diesen nahestehenden Verbindungen benützt worden. So hat A. Hesse das Pinen, den Hauptbestandteil des Terpentinöls, unter Vermittelung der Magnesiumverbindung des Pinenhydrochlorids (Bornylchlorids) in Borneol verwandelt. Pinenchlorhydratmagnesium gibt nämlich bei der Einwirkung von Sauerstoff und Zersetzung der dabei entstandenen Magnesiumverbindung $C_{10}H_{17}O$-MgCl mit Wasser (verdünnten Säuren) fast quantitativ Borneol. Letzteres geht durch Oxydation in Kampfer über



f) Die Anwendung der Grignardschen Reaktion auf Cyklaminone hat Bedeutung für die Synthese von Alkaloiden und von diesen nahe stehenden Verbindungen gewonnen. So gelangte Decker vom Einwirkungsprodukt des Benzylmagnesiumchlorids auf N-Methylisochonolen zum 1-Benzylisochinolin, der Stammsubstanz des Opiumalkaloides Papaverin. A. Kaufmann erhielt durch Wechselwirkung von 4-Cyan-chinolinen mit Organomagnesiumverbindungen die 4-Chinolyl-Ketone und durch weitere Umformung der letzteren Verbindungen, welche eine dem Chinin analoge Struktur besitzen und mit ihm nicht nur in chemischer sondern auch in physiologischer Hinsicht übereinstimmen. Die ganze Reihe der bis jetzt derartig synthetisierten Körper sind kräftige Fiebermittel, wenig giftig gegen Mensch und Tier, stark gegen Infusorien, Paramaecium usw. Die Bedeutung dieser in jüngster Zeit erhaltenen Kunstprodukte in der Bekämpfung der Wechselfieber und der Malaria ist zwar vorerst noch nicht abzusehen. Aber die Mannigfaltigkeit der Synthese ermöglicht es hier, in einfacher Weise die wirksamen Gruppen bei gleichem Grundkörper zu modifizieren und zu entgiften und von einer großen Anzahl von Homologen und sämtlich dem Chinin analogen Verbindungen schließlich das beste und zugleich unschädlichste Präparat auszusuchen.

g) Schließlich sind die Organomagnesiumverbindungen noch wichtig für die Gewinnung von anderen Alkyl- und Arylmetallverbindungen. So z. B. erhält man die Alkylbleiverbindungen, aus denen sich die Vierwertigkeit des Bleis ergibt, am bequemsten durch Umsetzung der Alkylmagnesiumhaloide mit Bleichlorid:



$$2PbCl_2 + 4CH_3.MgJ = Pb + Pb(CH_3)_4 + 4MgClJ.$$

Da jetzt metallisches Calcium von den elektrochemischen Werken in Bitterfeld bequem zugänglich gemacht worden ist, erscheint auch die von Beckmann aufgefundene Tatsache erwähnenswert, daß gleich dem Magnesium das Calcium befähigt ist, Grignards Reaktion zustande zu bringen. Man erhält bei Einwirkung von fein verteiltem Calcium auf die ätherische Lösung von Halogenalkylen Organocalciumverbindungen R.Ca.Hal, die sich durch ähn-

liche Reaktionsfähigkeit wie die Organomagnesiumverbindungen auszeichnen.

5. Synthesen mit Acetessigester und verwandten Verbindungen. Verbindungen, welche eine Methylengruppe: CH_2 zwischen zwei sauren, organischen Resten enthalten, sind im allgemeinen befähigt, ein Methylenwasserstoffatom leicht gegen ein Metallatom, insbesondere gegen ein Natriumatom auszutauschen. Es gilt dies für den Acetessigester $CH_3COCH_2COOC_2H_5$, Malonsäureester $CH_2(COOC_2H_5)_2$, Cyanessigester $CNCH_2COOC_2H_5$, für Acetylaceton $CH_3COCH_2COCH_3$, Desoxybenzoin $C_6H_5COCH_2C_6H_5$ usw. Derartige Natriumverbindungen sind ein geeignetes Ausgangsmaterial für synthetische Zwecke, wie wir am Acetessigester zeigen wollen.

Mit Hilfe der Natriumverbindung ist es möglich, die verschiedensten Gruppen in das Molekül des Acetessigesters einzuführen. Denn bei Einwirkung verschiedener organischer Halogenverbindungen auf dieselbe tritt das Halogen mit dem Natrium als Halogennatrium aus, während sich die organischen Reste miteinander vereinigen. Nachfolgende Beispiele mögen dies erläutern.

$$1.\quad CH_3.CO.CHNa.COOC_2H_5 + J.CH_3 = \underset{\substack{\textstyle CH_3 \\ \text{Methylacetessigester}}}{CH_3.CO.CH.COOC_2H_5} + NaJ$$

$$2.\quad CH_3.CO.CHNa.COOC_2H_5 + \underset{\text{Acetylchlorid}}{Cl.COCH_3} = \underset{\substack{\textstyle CH_3.CO \\ \text{Acetylacetessigester} \\ \text{oder Diacetylessigester}}}{CH_3.CO.CH.COOC_2H_5} + NaCl$$

$$3.\quad CH_3.CO.CHNa.COOC_2H_5 + \underset{\text{Chloressigsäureester}}{Cl.CH_2.COOC_2H_5}$$

$$= \underset{\substack{\textstyle CH_2.COOC_2H_5 \\ \text{Acetbernsteinsäureester}}}{CH_3.CO.CH.COOC_2H_5} + NaCl$$

Die so entstandenen Verbindungen vermögen aber das an der ursprünglichen Methylengruppe des Acetessigesters noch befindliche Wasserstoffatom mit gleicher Leichtigkeit abermals durch alle möglichen Radikale zu ersetzen, wenn sie durch Natrium oder Natriumalkoholat wieder in die Natriumverbindungen übergeführt und letztere mit Halogenverbindungen behandelt werden, z. B.

$$\underset{\substack{\textstyle CH_3 \\ \text{Natriummethylacetessigester}}}{CH_3.CO.CNa.CO_2C_2H_5} + \underset{\text{Propylbromid}}{BrC_3H_7} = \underset{\substack{\textstyle CH_3\ \ C_3H_7 \\ \text{Methylpropylacetessigester}}}{CH_3.CO\text{—}C\text{—}CO_2C_2H_5} + NaBr$$

Es leuchtet ein, daß man schon durch diese Reaktionen eine große Anzahl von neuen Verbindungen aus dem Acetessigester gewinnen kann. Aus allen diesen Körpern lassen sich nun einfachere herstellen, indem man sie spaltet. Der Acetessigester kann nämlich in zweierlei Weise Spaltung erleiden und man bezeichnet dieselbe je nach der Art der entstehenden Produkte als „Ketonspaltung" (I) und als „Säurespaltung" (II).

$$\text{I}\quad CH_3.CO.CH_2.COOC_2H_5 + HOH = \underset{\text{Aceton}}{CH_3.CO.CH_3} + CO_2 + C_2H_5.OH$$

$$\text{II}\quad CH_3.CO.CH_2.COOC_2H_5 + 2HOH = \underset{\text{Essigsäure}}{2CH_3.COOH} + C_2H_5.OH$$

Erstere findet hauptsächlich beim Erhitzen mit verdünnten Säuren und verdünnten Alkalien, letztere beim Erhitzen mit starken Alkalilaugen statt. Da nun die oben erwähnten, aus dem Natracetessigester darstellbaren Verbindungen in der gleichen Weise wie der Acetessigester selbst gespalten werden können, so hat man hier einerseits eine allgemeine Methode, um aus dem Acetessigester mono- und disubstituierte Methylketone

$$RCH_2.CO.CH_3 \text{ und } RR'.CH.CO.CH_3,$$

andererseits eine allgemeine Methode, um aus dem Acetessigester mono- und disubstituierte Essigsäuren

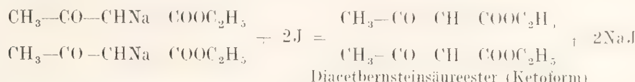
$$RCH_2.COOH \text{ und } RR'CH.COOH$$

zu gewinnen.

Doch sind hiermit die zahlreichen mit Hilfe des Acetessigesters durchführbaren Synthesen noch keineswegs erschöpft.

Es können auch zwei Moleküle Acetessigessig miteinander verknüpft werden, und zwar: a) direkt bei Einwirkung von Jod auf Natracetessigester; b) durch die verschie-

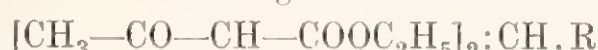
densten zweiwertigen Reste bei Kondensation von Acetessigester mit Aldehyden oder Alkylenbromiden. Im Falle a entsteht der **Diacetbernsteinsäureester**, der in mehreren desmotrop-isomeren Formen isoliert worden ist und dessen Studium wesentlich zur Aufklärung des Tautomerieproblems beigetragen hat; bei der Ketonspaltung liefert er Acetonylaceton.



$$\begin{matrix} CH_3—CO—CHNa\ \ COOC_2H_5 \\ CH_3—CO—CHNa\ \ COOC_2H_5 \end{matrix} + 2J = \begin{matrix} CH_3—CO\ \ CH\ \ COOC_2H_5 \\ CH_3—CO\ \ CH\ \ COOC_2H_5 \end{matrix} + 2NaJ$$

Diacetbernsteinsäureester (Ketoform)

Im Falle b bilden sich Acetessigesterderivate von der allgemeinen Formel



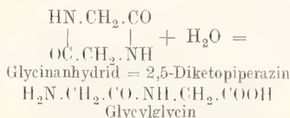
$$[CH_3—CO—CH—COOC_2H_5]_2:CH.R$$

die zuerst von Hantzsch und von Knoevenagel dargestellt wurden und in der Neuzeit ebenfalls bei Studien über das Tautomerieproblem eine große Rolle spielen.

Endlich ist noch hervorzuheben, daß sich der Acetessigester auch mit stickstoffhaltigen Körpern — Ammoniak, Aminbasen, Hydrazinen, Hydroxylamin — vereinigen kann. Das ist sehr wichtig für die Synthese verschiedener heterozyklischer Verbindungen, wie Pyrazol-, Pyrrol- und Isoxazolabkömmlinge.

6. Synthesen von Polypeptiden. Die hydrolytische Spaltung der Proteine führt durch verschiedene Zwischenglieder (Albumosen, Peptone) hindurch schließlich zu den Aminosäuren (vgl. Abbau S. 5). Dadurch ist zunächst ein analytisches Arbeitsgebiet in der organischen Chemie erschlossen worden, welches einer großen Ausdehnung fähig ist. Aber auch für die Synthese dehnt sich hier ein fast unübersehbares Feld aus, welches in den letzten Jahren insbesondere von E. Fischer und Curtius eifrig bestellt worden ist. E. Fischer hat neuerdings Methoden aufgefunden, um die Moleküle verschiedener Aminosäuren durch amidartige Verkettung aneinander zu reihen. Er bezeichnet die so entstehenden Produkte, deren einfachster Vertreter das vom Glykokoll oder Glycin H_2NCH_2COOH sich ableitende Glycyl-glycin $H_2NCH_2CO.NHCH_2COOH$ ist, mit dem Sammelnamen Polypeptide. Nach der Anzahl der in ihnen enthaltenen Aminosäuren werden sie als Di-, Tri-, Tetrapeptide usw. unterschieden. Die höheren Glieder dieser synthetischen Körperklasse sind in bezug auf äußere Eigenschaften, gewisse Farbenreaktionen, Verhalten gegen Säuren, Alkalien und Fermente den natürlichen Peptonen so ähnlich, daß man sie als ihre nächsten Verwandten betrachten kann, und daß ihre Gewinnung den Beginn, der Synthese der natürlichen Peptone und Albumosen bedeutet. Man hat mehrere solcher Polypeptide durch vorsichtige Spaltung von Proteinstoffen erhalten und man kann erwarten, daß das Studium der Polypeptide uns den endgültigen Aufschluß über die Art der Verkettung der Aminosäuren in den Proteinstoffen und damit über deren Natur geben wird. Von den Methoden zur Synthese der Polypeptide seien folgende angeführt.

Die **Dipeptide** lassen sich durch Aufspaltung der 2,5-Diketopiperazine erhalten, welche ihrerseits entstehen durch Abspaltung von 2 Mol. Wasser aus α-Aminosäuren, bezw. von 2 Mol. Alkohol aus deren Estern



$$\begin{matrix} HN.CH_2.CO \\ | \quad\quad | \\ OC.CH_2.NH \end{matrix} + H_2O =$$

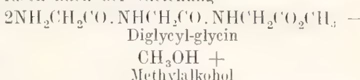
Glycinanhydrid = 2,5-Diketopiperazin

$$H_2N.CH_2.CO.NH.CH_2.COOH$$

Glycylglycin

Ebenso leicht wie die freie Aminosäure läßt sich ihr Ester, $H_2N.CH_2.CO.NH.CH_2.CO_2C_2H_5$, aus dem Glycinanhydrid durch Kochen mit alkoholischer Salzsäure bereiten.

Zum Aufbau komplizierterer Systeme von Polypeptiden kann die Abspaltung von 1 Mol. Alkohol, wie sie zwischen 2 Mol. mancher Aminosäureester und höherer Polypeptide eintritt, dienen. So z. B. geht der Methylester des Diglycyl-glycins bei 100° rasch nach der Gleichung



$$2NH_2CH_2CO.NHCH_2CO.NHCH_2CO_2CH_3 =$$

Diglycyl-glycin

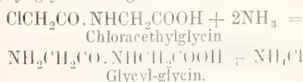
$$CH_3OH +$$

Methylalkohol

$$NH_2CH_2CO.(NHCH_2CO)_4.NHCH_2CO_2CH_3$$

in den Methylester des Hexapeptids über, aus dem das Hexapeptid durch Verseifung erhalten werden kann.

Durch Behandlung der Aminosäuren oder ihrer Ester mit halogenierten Säurechloriden und nachträgliche Einwirkung von Ammoniak auf die entstandenen Produkte erhält man Dipeptide. So z. B. führt die Einwirkung von Chloracetylchlorid $Cl.CH_2.CO.Cl$ auf Glycin $H_2N.CH_2.COOH$ zum Chloracethylglycin, das mit Ammoniak in Glycyl-glycin übergeht:



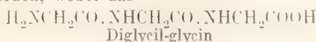
$$ClCH_2CO.NHCH_2COOH + 2NH_3 =$$

Chloracethylglycin

$$NH_2CH_2CO.NHCH_2COOH + NH_4Cl$$

Glycyl-glycin.

Das Glycyl-glycin kann von neuem mit Chloracetylchlorid kombiniert und das entstandene Produkt mit Ammoniak behandelt werden, wobei das

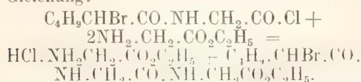


$$H_2NCH_2CO.NHCH_2CO.NHCH_2COOH$$

Diglycil-glycin

resultiert. Mit dieser Halogenacyl-Methode sind die meisten bisher bekannten Polypeptide gewonnen worden, da als Komponenten einerseits die verschiedensten Halogenacylchloride, andererseits außer den gewöhnlichen Aminosäuren auch die Oxyaminosäuren und komplizirtere Substanzen wie Cystin verwendet werden können.

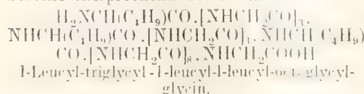
Die Kette der Aminosäuren kann auch auf der Seite des Karboxyls verlängert werden. Von den hierzu ausgearbeiteten Verfahren ist für die Synthese von Polypeptiden das folgende am wichtigsten. Beim Schütteln der Aminosäuren mit Acetylchlorid und Phosphorpentachlorid entstehen die Hydrochlorate der Aminosäurechloride, die sich leicht mit den Estern von Aminosäuren oder Polypeptiden verkuppeln lassen. So z. B. reagiert das Chlorid vom α-Bromisocapronylglycin mit Glycinester nach folgender Gleichung:



$$C_4H_9CHBr.CO.NH.CH_2.CO.Cl + 2NH_2.CH_2.CO_2C_2H_5 = HCl.NH_2CH_2.CO_2C_2H_5 + C_4H_9.CHBr.CO.NH.CH_2.CO.NH.CH_2CO_2C_2H_5.$$

Der erhaltene Ester kann durch Verseifung und nachfolgende Behandlung mit Ammoniak in Leucylglycylglycin verwandelt werden. Diese Methode ist besonders wichtig in ihrer Anwendung auf optisch-aktive Aminosäuren, weil dabei optisch-aktive Polypeptide erhalten werden. Sie sind von Interesse, einerseits weil die in der Natur vorkommenden Proteine sowie ihre Spaltungsprodukte — Albumosen, Peptone usw. — aktiv sind, andererseits weil die höheren Formen mit der großen Anzahl asymmetrischer Kohlenstoffatome in weitgehendem Maße Gelegenheit bieten, wichtige Schlußfolgerungen der Stereochemie zu prüfen.

Mit Hilfe dieser Methoden konnten bisher über 100 Polypeptide der verschiedensten Zusammensetzung hergestellt werden. Es ist E. Fischer gelungen, die Synthese bis zu einem Octadecapeptid fortzusetzen, das aus 15 Glykokoll- und 3l-Leucinresten besteht entsprechend der Formel



$$H_2NCH(C_4H_9)CO.[NHCH_2CO]_3.NHCH(C_4H_9)CO.[NHCH_2CO]_3.NHCH(C_4H_9)CO.[NHCH_2CO]_8.NHCH_2COOH$$

l-Leucyl-triglycyl-l-leucyl-l-leucyl-oct. glycyl-glycin.

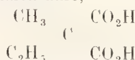
Das Produkt nähert sich in allen seinen Eigenschaften sehr einigen natürlichen Proteinen. Mit dem Molekulargewicht 1213 übertrifft es die meisten Fette, von denen z. B. das Tristearin nur 891 hat. Es zählt deshalb zu den kompliziertesten Systemen von bekannter Konstitution, die man bisher durch Synthese darstellen konnte.

H. Meyer hat versucht, die eben geschilderten Methoden, nach denen die Vereinigung aliphatischer Aminosäurereste durchgeführt wurde, auf die Benzolreihe anzuwenden. Doch war es weder mit den Estern noch mit den Chloriden möglich, amidartige Verkettungen zu erzielen. Dahingegen sind solche nach einem anderen Verfahren gelungen.

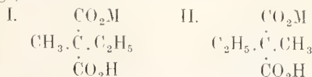
7. Asymmetrische Synthese. Die im Vordergrund stehende Verschiedenheit von Isomeren mit asymmetrischem Kohlenstoffatom — man versteht darunter ein Kohlenstoffatom, dessen vier Valenzen durch vier verschiedene einwertige Atome oder Gruppen gesättigt sind — ist die in der optischen Aktivität im flüssigen oder gelösten Zustand. Sie zeigt sich in einer entgegengesetzten Drehung des polarisierten Lichtes und man kann auf Grund reichen Tatsachenmaterials den Satz aussprechen: Zu jeder Verbindung mit einem asymmetrischen Kohlenstoffatom, welche die Polarisationsebene um einen bestimmten Winkel in einer Richtung dreht, gehört eine isomere Verbindung, welche bei Identität der übrigen Eigenschaften die Ebene des polarisierten Lichtes um denselben Betrag in entgegengesetztem Sinne ablenkt. Man nennt die beiden Isomeren deshalb optische Antipoden und unterscheidet sie willkürlich als rechts- und linksdrehende Modifikation, abgekürzt durch die Buchstaben d (dexter) und l (laevus). Wenn sich isomolekulare Mengen der rechts- und der linksdrehenden Modifikation einer Substanz miteinander vereinigen, so entsteht ein polymerer Körper, in welchem das optische Drehungsvermögen durch gegenseitige Kompensation seiner Bestandteile aufgehoben ist. Solche inaktiven Körper heißen Racemverbindungen oder auch wohl racemische Gemische, man bezeichnet sie gewöhnlich als r-Form. Die optisch aktiven Verbindungen sind in der Natur außerordentlich verbreitet. Dagegen zeigen synthetisch dargestellte Verbindungen mit asymmetrischen Kohlenstoffatomen — falls die Synthese ohne Anwendung bereits aktiver Verbindungen durchgeführt wird — nie optische Aktivität. Sie gehören meist dem racemischen Typus an, weil bei einer derartigen chemischen Synthese stets gleichmolekulare Mengen der rechtsdrehenden und linksdrehenden Konfiguration gebildet werden. Fast durchwegs aktiv sind solche Verbindungen, welche durch den lebenden Organismus hindurchgegangen sind. Beteiligen sich an der chemischen Synthese

intermediär optisch-aktive Verbindungen, so ist, wie neuerdings gefunden wurde, die Bildung einer aktiven Substanz aus einer inaktiven, symmetrisch konstruierten Verbindung unter Vermeidung jedes analytischen Vorganges möglich. Durch diese sogenannte „asymmetrische Synthese" kann also in gewisser Weise die Tätigkeit des lebenden Organismus nachgeahmt werden.

Die Anregung zu solchen Versuchen, auf rein chemischem Wege die biologischen Vorgänge in gewisser Weise nachzuahmen, hat E. Fischer durch die Hypothese gegeben, daß die Kohlensäure von den komplizierten optisch-aktiven Substanzen des Chlorophyllkernes bezw. der assimilierenden Pflanzenzelle gebunden wird, und daß dann die synthetische Umwandlung in Zucker unter dem Einfluß der schon bestehenden Asymmetrie des Moleküls auch in symmetrischem Sinne vonstatten geht. Als erste asymmetrische Synthese hat nun W. Marckwald diejenige der optisch-aktiven Valeriansäure durchgeführt. Er ging dabei von der Methyläthylmalonsäure,



aus. Sie ist nicht nur nach sterischen Gesichtspunkten, sondern auch in bezug auf die Lage der beiden Carboxylgruppen zum Gesamtmolekül symmetrisch konstruiert. Ersetzt man aber je eines der ionisierenden Wasserstoffatome durch Metall, so erhält man zwei Formelbilder, deren Projektion zeigt, daß



die beiden Salze nicht identisch sind, sondern in Spiegelbildisomerie stehen. Beim Eindampfen der Lösung eines solchen Salzes, z. B. derjenigen des sauren methyläthylmalonsauren Kaliums, erhält man, da d- und l-Salz sich in gleichen Mengen aus der Lösung abscheiden, ein inaktives Gemenge der beiden Salze bezw. deren Racemverbindungen.

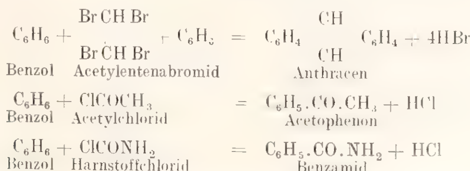
Bildet man hingegen das saure Salz einer optisch-aktiven Base, so sind die beiden Formen verschieden löslich und man erhält beim Eindampfen nur das eine Salz. Scheidet man aus dem Salz die Säure wieder ab, so muß das inaktive Ausgangsmaterial, das ja nicht asymmetrisch konstituiert ist, zurückgewonnen werden.

Alle Malonsäuren spalten nun beim Erhitzen leicht Kohlendioxyd ab und gehen in Monokarbonsäuren über. So entsteht aus der Methyläthylmalonsäure die Methyläthylessigsäure, $CH_3.CH(C_2H_5).CO_2H$, welche ein asymmetrisches Kohlenstoffatom enthält. Analog verhalten sich die sauren Salze der Malonsäurereihe, indem sie hauptsächlich die freie Carboxylgruppe als Kohlendioxyd abspalten.

Marckwald führte den Versuch mit dem sauren Brucinsalz der Methyläthylmalonsäure durch. Es spaltet beim Erhitzen auf 170° Kohlendioxyd ab und nach dem Zerlegen des Rückstandes mit verdünnter Schwefelsäure und Abblasen der Valeriansäure mit Wasserdampf resultiert ein Produkt, das etwa 10% l-Valeriansäure, $CH_3CH(C_2H_5)COOH$, enthält.

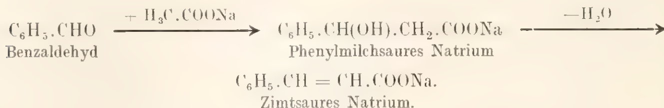
Hierdurch ist bewiesen, daß aus der Methyläthylmalonsäure durch Abspaltung von Kohlensäure unter asymmetrischen Reaktionsbedingungen direkt optisch-aktive Valeriansäure dargestellt werden kann.

8. Synthesen mittels Aluminiumchlorids. Friedel und Crafts wiesen im Jahre 1877 nach, daß Körper, welche Halogen in aliphatischer Bindung enthalten und Benzolkohlenwasserstoffe in Gegenwart von Aluminiumchlorid in der Weise aufeinander einwirken, daß das Halogen mit einem aromatisch gebundenen Wasserstoffatom des Benzolkohlenwasserstoffs als Halogenwasserstoffsäure austritt und die übrig bleibenden Reste sich vereinigen. Es stellte sich bald die Allgemeinheit der Reaktion von Friedel und Crafts heraus. Sie ermöglicht die Synthese von zahlreichen Homologen des Benzols und anderen aromatischen Kohlenwasserstoffen, von aromatischen Ketonen und Oxyketonen sowie von Karbonsäuren, wie nachfolgende Beispiele zeigen.



9. Synthesen durch Kondensation von Säuren mit Aldehyden. Perkinsche Reaktion. Sie beruht auf der Fähigkeit der Natriumsalze gewisser Säuren, sich bei

höherer Temperatur in Gegenwart von Eisessig oder Fettsäureanhydriden an Aldehyde unter Bildung von Oxykarbonsäuren anzulagern. Letztere spalten meistens noch während der Ausführung des Versuches Wasser ab und gehen in ungesättigte Säuren über. Das bekannteste Beispiel ist die Synthese von Zimtsäure durch Kondensation von Benzaldehyd mit Natriumacetat unter dem Einfluß von Essigsäureanhydrid. Hierbei spielen sich folgende Reaktionsphasen ab:



Die Perkinsche Reaktion kann Verwendung finden zur Synthese von zahlreichen Phenylolefinkarbonsäuren und deren Substitutionsprodukten. Einerseits lassen sich nämlich an Stelle von Benzaldehyd dessen Homologe, Halogen-, Nitrosubstitutionsprodukte usw. verwenden. Andererseits aber können an Stelle von essigsaurem Natrium die Natriumsalze von Homologen der Essigsäure, von aromatisch substituierten Essigsäuren, von halogen-substituierten Fettsäuren und von zweibasischen Fettsäuren benützt werden.

10. Synthesen von Farbstoffen. Auf dem unerschöpflichen Gebiete der organischen Farbstoffe hat die synthetische Chemie nicht nur stetige Fortschritte auf den früher eröffneten, allgemein bekannten Wegen zu verzeichnen, sondern auch wichtige Errungenschaften in der Neuzeit gezeitigt. Insbesondere sind hier hervorzuheben die technisch wertvollen Synthesen von Indigo, von Thioindigo, von verschiedenen Farbstoffen der Anthracenreihe (Indanthren, Flavanthren usw.) und von den sogenannten Schwefelfarbstoffen. Die wichtigsten Repräsentanten der sogenannten substantiven Azofarbstoffe sind so allgemein bekannt und über ihre technische Wichtigkeit ist bereits so viel geschrieben worden, daß ein bloßes Erinnern an dieselben genügt. Auch die sonstigen Azofarbstoffe, die Phthalein-, Azin-, Thiazin-, Akridinfarbstoffe und Alizarin sollen als Früchte synthetischer Arbeit früherer Jahre nicht unerwähnt bleiben und spielen eine große Rolle. Der Produktionswert der deutschen Farbenindustrie beträgt zurzeit etwa 250 Mill. M. und es werden davon etwa zwei Drittel exportiert. Daß der deutsche Export an organischen Farbstoffen sich dauernd — auch in den letzten Jahren — gehoben hat, dafür spricht die Tatsache, daß im Jahre 1906 allein die Mehrausfuhr rund 27 Mill. M. gegenüber dem Jahre 1905 betrug.

Die Synthesen des Indigoblaus bedeuten unter den verschiedenen Zweigen der synthetisch-organischen Chemie einen der wissenschaftlich und technisch wichtigsten. Kein Wunder also, daß sie wiederholt Gegenstand zusammenfassender Darstellungen gewesen sind.

Die synthetische Indigodarstellung, wie sie in der Badischen Anilin- und Sodafabrik erfolgt, geht vom billigen Naphthalin aus und durchläuft folgende Phasen:

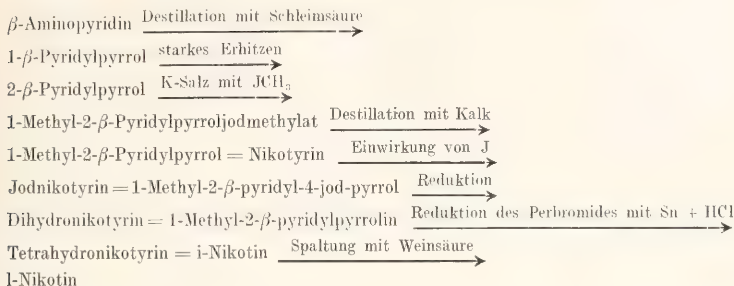
Naphthalin → Phthalsäure → Phthalimid → Anthranilsäure → Phenylglycin-o-karbonsäure → Indoxylsäure → Indoxyl → Indigo.

Das Natriumamidverfahren, durch welches ermöglicht ist, das Phenylglycin, also — da dasselbe durch Einwirkung von Anilin auf Monochloressigsäure dargestellt wird — in letzter Instanz das Anilin zum Ausgangspunkt für die Indigodarstellung zu wählen, wird in großem Maßstabe von den Farbwerken vorm. Meister, Lucius und Brüning ausgeführt. Die einzelnen Phasen dieser Fabrikation lassen sich durch das Schema zum Ausdruck bringen:

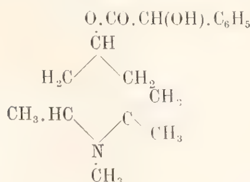
Benzol → Nitrobenzol → Anilin → Phenylglycin → Indoxyl → Indigo.

11. Synthesen von Alkoloiden und verwandten Verbindungen. Auf dem Gebiete der Alkaloidchemie hat die synthetische Forschung in neuerer Zeit verschiedene recht wichtige Erfolge gezeitigt, die hier nur in Kürze angedeutet seien. Die von Ladenburg im Jahre 1886 durchgeführte Synthese des Schierlingalkaloids Coniin (d-, α-, n-Propylpiperidin) ist als der erste vollkommene Aufbau eines natürlichen Alkaloids von großem historischen Interesse. Von weiteren verhältnismäßig einfach gebauten Alkaloiden sind vor wenigen Jahren Arecaidin und Arecolin, die in der Areca- oder Betelnuß vorkommen, von Wohl und Johnson synthetisiert worden. Das in Früchten und Samen verschiedener Pfefferarten enthaltene Piperin läßt sich aus seinen Spaltungsprodukten Piperidin und Piperinsäure wieder aufbauen. Das Piperidin ist schon im Jahre 1885 von Ladenburg durch Destillation des salzsauren Pentamethylendiamins synthetisch dargestellt worden. Auch die Synthese der Piperinsäure

ist geglückt, so daß die Synthese des Piperins eine vollständige zu nennen ist. A. Pictet konnte in Gemeinschaft mit seinen Mitarbeitern die totale Synthese des in den Tabaksblättern vorkommenden Nikotins durchführen. Unter Benutzung des β-Aminopyridins als Ausgangsmaterial geht die vollständige Synthese des Alkaloids der Reihe nach über die folgenden Verbindungen:



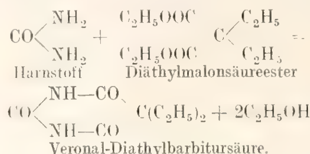
Die von Willstätter vollzogene synthetische Darstellungsweise des Tropidins bedeutet die totale Synthese der Solanaceenalkaloide Atropin, Atropamin und Belladonin sowie des Hyoscyamins und des Kokaalkaloids Tropakokain. Von Ladenburg sind eine Reihe von Verbindungen, die sogenannten Tropeine, hergestellt worden, welche dem Atropin, zum Teil auch in ihrer physiologischen Wirkung, nahe verwandt sind. Unter ihnen ist das aus Tropin und Mandelsäure entstehende Phenylglykolyltropein $C_8H_{14}N(O.CO.OC_7H_7)$, Homatropin genannt, hervorzuheben, da es wegen seiner weniger lang andauernden mydriatischen Wirkung an Stelle des Atropins in Form seines Bromhydrates Anwendung findet. Fußend auf die nahen Beziehungen des Tropins zu den synthetischen Basen der Triacetonaminreihe hat Harries Tropeine der Triacetonaminreihe dargestellt. Unter ihnen hat besonders das



Phenylglykolyl-N-Methyl-β-Vinyldiacetonalkamin, Euphthalmin genannt, als ein kräftiges, die Akkommodation nicht beeinflussendes Mydriatikum Bedeutung erlangt. Synthetische Erfolge in der Gruppe der Opium- und Chinaalkaloide wurden bereits im vorhergehenden bei den Organo-magnesiumverbindungen erwähnt. Von großem wissenschaftlichen und praktischen Interesse sind die schönen Erfolge, welche die synthetische Chemie durch die umfassenden Arbeiten von Emil Fischer in der Puringruppe errungen hat. Es gehören hierher nicht nur die Pflanzenalkaloide Theobromin, Theophyllin und Kaffein, sondern auch sehr wichtige Erzeugnisse des Tierleibes, wie Harnsäure, Xanthin, Hypoxanthin, Adenin und Guanin. Die letzteren zählen zu denjenigen chemischen Verbindungen, an welche die Lebensfunktionen direkt gebunden sind. Synthesen finden wir bei Körpern der Puringruppe in mannigfaltigster Weise durchgeführt. Es sind nicht nur die 12 natürlich vorkommenden, sondern insgesamt gegen 200 Glieder der Reihe künstlich aufgebaut worden. Die Methoden, welche hierzu gedient haben, sind an anderen Stellen des Handwörterbuches näher dargelegt, und es möge deshalb hier nur noch folgendes bemerkt werden. Die Synthesen haben nicht nur zu neuen fabrikatorischen Gewinnungsmethoden für bereits bekannte (Kaffein, Theobromin, Theophyllin) sowie für neue Medikamente geführt, sondern auch die Physiologie, die Biologie und praktische Medizin hat aus denselben Nutzen ziehen können. So hat man, nachdem durch die Synthese die nahe Verwandtschaft von Harnsäure und Xanthinbasen und die Ueberführbarkeit derselben ineinander bewiesen war, Versuche angestellt, welche ergaben, daß die Xanthinbasen als eine der wichtigsten Quellen für die Entstehung von Harnsäure im Organismus betrachtet werden müssen. Damit ist ein neuer Gesichtspunkt für die praktische Medizin gewonnen, indem man bei Personen, welche

zu harnsaurer Diathese neigen, solche Stoffe zur Ernährung vermeidet, die reich an Xanthinbasen sind.

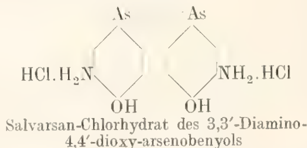
12. Synthese von Arzneimitteln. In zahlreichen Fällen, in denen der Bau der Pflanzenalkaloide und auch derjenige von anderen Bestandteilen wirksamer Drogen so kompliziert ist, daß man sie auf synthetischem Wege noch nicht herzustellen vermochte, wurde zunächst erforscht, auf welchem Teile des Moleküls die Wirkungen der Substanzen beruhen. Alsdann wurden analog konstituierte Körper künstlich aufgebaut unter der Annahme, daß die Aehnlichkeit in der Konstitution der Verbindungen analoge physiologische Wirkung derselben im Organismus bedinge. So schufen die synthetischen Chemiker auf Grund von Erfahrungen, die an Alkaloiden und auch an zahlreichen anderen natürlich vorkommenden Heilmitteln gemacht wurden — nicht selten auch auf Grund von glücklichen Spekulationen — eine Unzahl von physiologisch wirksamen Substanzen, aus denen die wirklich guten und brauchbaren von den Aerzten für die Verwendung als künstliche Arneimittel ausgesucht wurden. So stehen also mit den Forschungen auf dem Alkaloidgebiet im Zusammenhang die Synthesen neuer Arzneimittel. Die synthetisch gewonnenen, physiologisch wirksamen Substanzen mit therapeutisch verwertbaren Eigenschaften zählen schon nach Tausenden. Uebrigens ist wiederholt darauf hingewiesen worden, daß die moderne synthetische Chemie, welche sich mit Arzneimitteldarstellung beschäftigt, nur scheinbar eine so ungeheure Anzahl von denselben erzeugt hat; verfolgt man kritisch die Entwickelung dieser Richtung in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, so ist zu erkennen, daß nur wenige wirksame Grundsubstanzen tatsächlich gefunden wurden und daß dann eine ganze Reihe von Variationen gleichwertiger oder minderwertiger Art, welche von diesen Grundsubstanzen ausgingen und sich voneinander nur in unwesentlichen Gruppen unterscheiden, als Konkurrenzpräparate in den Handel kamen. Die größten Erfolge der synthetischen Arzneimittelchemie dürften wohl auf dem Gebiete der antipyretischen Mittel sowie der Schlafmittel liegen. Wir nennen von den ersteren nur Antipyrin oder 1-Phenyl-2,3-dimethyl-5-pyrazolon ferner Acetanilid $C_6H_5NH.COCH_3$ und Phenacetin $C_2H_5O.C_6H_4.NHCOCH_3$, die nebst einer Reihe ähnlicher Präparate ausgedehnte Anwendung finden. Im Jahre 1899 wurde an Antipyrin allein ein Ausführungsüberschuß von 17000 kg im Werte von etwa 700000 M. erzielt. Die synthetischen Schlafmittel sind außerordentlich zahlreich; ein sehr wirksames, aus der Neuzeit stammendes ist das Veronal, das durch Kondensation von Harnstoff mit Diäthylmalonsäureester dargestellt wird:



Veronal-Diathylbarbitursäure.

Als interessante Beispiele für den zielbewußten synthetischen Aufbau von Arzneimitteln können die neueren Lokalanästhetika dienen, von denen bereits Stovain erwähnt wurde und Orthoform, Nirvanin, Novocain noch genannt seien. Sie dienen bis zu einem gewissen Grade als Cocainersatz. Während im Jahre 1885 der Preis für 1 kg Cocain 8000 M. betrug, kostet dasselbe jetzt 235 M.

Wenn wir noch in aller Kürze die Antiseptika (Salizylsäure, Salol, Formaldehyd und seine Abkömmlinge, Jodoform und seine zahlreichen Ersatzmittel) und Adstringentia sowie die Arsenpräparate, von denen das wichtigste Salvarsan



Salvarsan-Chlorhydrat des 3,3′-Diamino-4,4′-dioxy-arsenobenyols

ist, erwähnen, dürfte die Uebersicht über die Arzneimittelsynthese abgeschlossen sein.

Das große Interesse, welches alle Disziplinen der Naturwissenschaften diesen Dingen entgegenbringen, berechtigt zu schönen Hoffnungen für die Zukunft.

Literatur. **M. Berthelot**, *Die chemische Synthese. Internationale wissenschaftliche Bibliothek*, 25, 1877. — **K. Elbs**, *Die synthetischen Darstellungsmethoden der Kohlenstoffverbindungen.* Leipzig 1889 und 1891. — **Th. Posner**, *Lehrbuch der synthetischen Methoden der organischen Chemie.* Leipzig [illegible]. — **J. Schmidt**, *Synthetisch-organische Chemie der Neuzeit.* Braunschweig 1908. — **R. Meyer**, *Pyrogene Acetylenkondensationen. Ber. d. deutsch. chem. Ges.*, 45. *Jahrg. (1912), S. 1609.* — **J. Tafel und W. Jürgens**, *Darstellung von Kohlenwasserstoffen durch elektrolytische Reduktion von Acetessigestern. Ber. d. deutsch. chem. Ges.*, 42. *Jahrg. (1909), S. 2548 und 3146.* — **Losanitsch und Jovitschitsch**, *Ber. d. deutsch. chem. Ges.*, 30. *Jahrg. (1897), S. 135;* 44. *Jahrg. (1911), S.* [illegible]. — **C. Harries**, *Ueber Kohlenwasserstoffe der Butadienreihe und über einige aus ihnen darstellbare künstliche Kautschukarten. Annal. d. Chem., 1911, Bd.* 383, *S. 157.* — **Der-**

selbe, *Ueber den künstlichen Kautschuk. Vom wissenschaftlichen Standpunkt. Ztschr. f. angew. Chemie,* **25.** *Jahrg. (1912), S. 1457.* — **F. Hofmann,** *Der synthetische Kautschuk. Vom Standpunkte der Technik. Ztschr. f. angew. Chemie,* **25.** *Jahrg. (1912), S. 1462.* — **J. Schmidt,** *Die organischen Magnesiumverbindungen und ihre Anwendung zu Synthesen. Stuttgart 1905 und 1908.* — **A. Kaufmann** *und Mitarbeiter, Ber. d. deutsch. chem. Ges.,* **45.** *Jahrg. (1912), S. 3090;* **46.** *Jahrg. (1913), S. 1823.* — **E. Fischer,** *Untersuchungen über Aminosäuren, Polypeptide und Proteine. Ber. d. deutsch. chem. Ges.,* **39.** *Jahrg. (1906), S. 530.* — **H. Meyer,** *Ann. d. Chem., 1907, Bd.* **351,** *S. 267.* — **W. Marckwald,** *Ber. d. deutsch. chem. Ges.,* **37.** *Jahrg. (1904), S. 349, 1368.* — **S. Tijmstra Bz.,** *Ber. d. deutsch. chem. Ges.,* **38.** *Jahrg. (1905), S. 2165.* — **A. Reissert,** *Geschichte und Systematik der Indigosynthese.* — **S. Fränkel,** *Die Arzneimittelsynthese, II. Aufl.*

J. Schmidt.

Synthese.

Elektrosynthese

1. Was ist Elektrosynthese? 2. Vorteile ihrer Anwendung. 3. Synthesen durch stille (dunkle oder Glimm-) Entladung oder elektromagnetische Schwingungen. 4. Durch den galvanischen Strom: a) Durch Zersetzung eines einzelnen Elektrolyten — an der Kathode — an der Anode — durch Zersetzung gemischter Elektrolyten; b) Durch Einwirkung entladener Ionen auf die Lösung oder die Elektroden — an der Kathode — an der Anode — durch Vermischung der Erzeugnisse beider.

1. Was ist Elektrosynthese? Unter Elektrosynthese läßt sich die mit Hilfe der chemischen Wirkung der Elektrizität ausgeführte Synthese verstehen (vgl. den Artikel „Präparative Arbeiten" 2) d. h., der Aufbau von komplizierter zusammengesetzten Stoffen aus einfacheren, wobei die Ionen (l. c. 11 und Artikel „Elektrizitätsleitung in Gasen") eine Rolle spielen. Die Synthesen mittels des elektrischen Funkens, durch den Lichtbogen oder durch einen stromdurchflossenen, in die Reaktionszone eingesenkten elektrischen Leiter (Ausnutzung der Jouleschen Wärme), sogenannte elektrothermische Synthesen, sind demnach im folgenden nicht behandelt, obgleich zu ihnen die erste Synthese, unmittelbar aus elementarem Kohlenstoff und Wasserstoff gehört. Denn nach gegenwärtiger Erfahrung beruhen sie, wenn nicht völlig, doch in der Hauptsache auf den durch genannte Elektrizitätsformen erzeugten hohen Temperaturen. Es gelten durch das Massenwirkungsgesetz beherrschte, thermische Gleichgewichte. Doch scheinen vereinzelte Beobachtungen, z. B. am gekühlten Hochspannungsbogen, für eine unter Umständen auch chemische Wirkung zu sprechen und Versuche auf elektrochemischem Gebiet für eine solche der an den Polen des Funkens, bezw. Lichtbogens herrschenden hohen elektrischen Spannung, wenn diese Pole zugleich an der Reaktion teilnehmen.

2. Vorteile ihrer Anwendung. Die Elektrosynthese bietet für die Darstellung chemischer Präparate den Vorteil, daß für die rein chemische Bereitung notwendige Hilfsstoffe fortfallen oder auch einfacher zur Einwirkung gelangen und mehrere Operationen in einer vereinigt werden können, namentlich wenn es gelingt, die Schwierigkeit zu überwinden, stets beide Eintrittsstellen der Elektrizität voll auszunützen. Begünstigungen der Reaktion durch Temperaturerhöhungen sind vorteilhafter als durch äußere Erhitzung durch den durchgehenden Strom selbst von innen heraus zu bewirken. Auch läßt sich elektrosynthetisch die Energie der gegenseitigen Einwirkung der Stoffe oft weitgehender und leichter verändern und regeln, als rein chemisch. Es ist möglich, weit einfacher als im letzteren Falle die Verbindungen bis in ihre letzten Elemente und Atomgruppen aufzuspalten und gleichzeitig in anderer Art wieder aufzubauen, und so die verwickelten synthetischen Prozesse im Tier- und Pflanzenreich in gewisser Art nachzuahmen (s. Abschnitt 3). Mit dem stetigen Sinken der Kosten für Elektrizitätsbeschaffung dürfte also trotz der (nicht immer) umständlicheren Apparatur gegenüber der rein chemischen, die Bedeutung der Elektrosynthese, abgesehen von ihrer theoretisch wissenschaftlichen Anwendung, für die Herstellung chemischer Präparate des Laboratoriums und der Industrie dauernd zunehmen.

3. Synthesen durch stille (dunkle oder Glimm-) Entladung oder elektromagnetische Schwingungen. Die stille (dunkle oder Glimm-) Entladung ist eine, oft nur von schwachem Aufleuchten begleitete Entladung hochgespannter Elektrizität durch Gase oder Dämpfe hindurch. Diese befinden sich im allgemeinen zwischen dielektrischen Wandungen, wobei die Erwärmung gering und namentlich die Höhe der elektrischen Spannung, die geometrischen Verhältnisse des Apparats, der Druck in demselben, sowie die Zeit der Einwirkung oft von größtem Einfluß nicht nur auf die Menge, sondern auch die Art der erzeugten Produkte ist. Bei deren Bildung scheinen gewisse, bisher nicht vom Massenwirkungsgesetz als abhängig erwiesene, stationäre Gleichgewichtszustände aufzutreten; die chemisch arbeitenden Elektrizitätsmengen sind nur ein geringer Anteil der durchgeschickten

und Farradays Gesetz hat sich bis jetzt nicht bestätigen lassen. Inwieweit Strahlungserscheinungen, z. B. kurzwellige sich an der Wirkung beteiligen (Photosynthesen), ist zurzeit unbekannt. Doch ist hier das Gebiet der erstmaligen Auffindung interessanter Stoffe, z. B. des Schwefelperoxyds (S_2O_7), einer als Stickstofftrioxyd (N_2O_6 bezw. NO_3) aufgefaßten Substanz und einer Reihe hochmolekularer anorganischer und organischer Verbindungen von größtenteils noch ganz unbekannter Konstitution.

Man hat es in synthetischer Hinsicht hier hauptsächlich mit einer die Anlagerung, Kondensation und Polymerisation begünstigenden Elektrizitätsform zu tun. So vermögen sich unter ihrem Einfluß die Elemente Stickstoff (N_2) und Sauerstoff (O_2) zu Stickztoffoxyden bis herauf zum Trioxyd (s. oben) zu verbinden, der Wasserstoff (H_2) mit dem Sauerstoff zu Wasser (H_2O), mit dem Chlor (Cl_2) zu Chlorwasserstoff (ClH), Chlor und Sauerstoff zu unterchloriger Säure (Cl_2O), Stickstoff und Wasserstoff unter Auftreten von Gleichgewichtszuständen (s. S. 981) zu Ammoniak (NH_3). Vereinigungen mehrerer Elemente finden ebenfalls, aber nicht immer glatt statt. So von Stickstoff, Wasserstoff und Sauerstoff zu Ammoniumnitrit (NO_2NH_4). Dasselbe entsteht auch aus Stickstoff und Wasserdampf. Hierbei bildet sich aber stets etwas freie salpetrige Säure (NHO_2). Als Stützpunkt dafür, daß zunächst aus Stickstoff und den Zerfallsprodukten des Wassers Sauer- und Wasserstoff sich Ammoniak und salpetrige Säure gebildet und diese beiden sich dann zum Ammoniumnitrit vereinigt haben. Auch stufenweise Synthese findet statt. Mit wenig Wasserdampf bildet Ammoniak Hydroxylamin (NH_2OH), mit viel, Ammoniumnitrit und Nitrat (NH_4NO_3). Ferner erfolgen Oxydationen durch Vereinigung mit Sauerstoff, aber zum Teil auch nicht glatt. So entsteht aus Kohlenoxyd Kohlendioxyd in bestimmtem Betrage ($CO + O = CO_2$). Aus Schwefeldioxyd (SO_2) und Sauerstoff wahrscheinlich unter Zwischenbildung von Schwefeltrioxyd (SO_3) und Abspaltung von Schwefel (S) das Schwefelperoxyd (S_2O_7), das Anhydrid der Perschwefelsäure. Bei der Bildung von Stickstoffdioxyd (NO_2) aus reinem Stickoxyd (NO) findet zunächst eine teilweise Spaltung des Oxyds unter Entlassung von Sauerstoff statt, welcher das noch übrige NO zu dem Dioxyd oxydiert.

Bekannt ist die Polymerisation des Sauerstoffs zu Ozon (O_3), eine der technischen Darstellungsarten dieses wichtigen Stoffes. Auch Cyan $(CN)_2$ erleidet Polymerisierung. Ferner wird Kohlenoxyd teilweise unter Entbindung von Sauerstoff gespalten. Der gebildete Kohlenstoff tritt mit dem verbleibenden Oxyd wahrscheinlich zunächst zu einem Kohlensuboxyd zusammen (vielleicht C_3O_2), welches sich dann sofort polymerisiert. Es besteht wenigstens eine bemerkenswerte Aehnlichkeit mit einem rein chemisch bereiteten polymeren Kohlensuboxyd (C_3O_2), einem Anhydrid der Malonsäure [$CH_2(COOH)_2 \div 2 H_2O$ C_3O_2]. Der Schwefelkohlenstoffdampf (CS_2) verhält sich je nach den Bedingungen fast noch eigentümlicher. In einem Fall polymerisiert er sich unzersetzt für sich zu schwarzbraunen, in allen Lösungsmitteln unlöslichen Krusten. Im Gemisch mit Wasserstoff, Kohlenoxyd, Aethylen, Acetylen entstehen Zusammenlagerungen von der allgemeinen Formel [$(3 - 5)$ (CS_2) 2 R] worin R einer der eben genannten Substanzen, ebenfalls schwarze bis braungelbe unlösliche Massen. — Dagegen können im anderen Fall durch beigemengtes Kohlenoxyd oder Wasserstoff Abspaltungen von Schwefel aus dem Schwefelkohlenstoff stattfinden und es bildet sich aus ihm dunkelgelbes Kohlenmonosulfid (CS). Läßt man aber die Entladung durch Schwefelkohlenstoffdampf von 78° gehen, der alsdann in einer auf —185° abgekühlten Vorlage verdichtet wird, so scheint sich gasförmiges, bisher in dieser Form ganz unbekanntes Kohlenmonosulfid zu bilden, welches sich zunächst in Gegenwart von Schwefelkohlenstoff zu weißen Blättchen kondensiert, die schon bei —215° anfangen sich zu bräunen, welche Bräunung bei —185° gewöhnlich unter Detonation und Lichterscheinung erfolgt.

Bei den organischen Verbindungen bestehen ähnliche Verhältnisse, wie bei den anorganischen. Namentlich entstehen hier durch Kondensation und Zusammenlagerung gleicher Elemente flüssige und feste, hochmolekulare Stoffe, die durch leichte Zersetzbarkeit, Verharzung, Sauerstoffaufnahme und andere unangenehme Eigenschaften der Erforschung ihrer Konstitution große Schwierigkeiten in den Weg stellen. Von den einfachen synthetisierten Verbindungen sind vor allem die Aldehyde begleitet von ihren Kondensations- und Polymerisationsprodukten zu nennen. So bilden Kohlenoxyd und Wasserstoff den Formaldehyd (HCOH). Schwefelwasserstoff statt Wasserstoff gibt Thiolformaldehyd bezw. dessen Polymeres $(HCSH)_x$, aus Kohlenoxyd (CO) und Methan (CH_4) oder Acetylen (C_2H_2) und Wasserdampf (H_2O) erhält man durch einfache Zusammenlagerung den Acetaldehyd (C_2H_4O). Der Formaldehyd kann sich aber in dem zuerst erwähnten Gemisch noch weiter unter dem Einfluß der Entladungen verändern und einen festen gelben Stoff liefern, der als ein leicht aufspaltbares, zuckerartiges Kondensationsprodukt des

Glyoxals (CHO.CHO) zu betrachten ist. Desgleichen liefern Kohlenoxyd (auch Kohlendioxyd) in Gegenwart von Alkoholdampf einen Zucker, die β-Acrose. Auch die Stärke läßt sich unter Wasseranlagerung verzuckern. Wir haben es hier schon mit einem ähnlich einfachen Aufbau komplizierter organischer Verbindungen zu tun, wie ihn der Pflanzenleib bei seinen Synthesen durchführt. Weitere einfache Verbindungen sind die Ketone. Aceton (CH_3COCH_3) entsteht sowohl durch Vereinigung von Kohlenoxyd (CO) und Aethan (C_2H_6) wie aus einem Gemisch von dampfförmigen Acetaldehyd und Wasserstoff durch verwickeltere Reaktionen, in welchem letzteren Fall sich noch Butanon ($C_2H_5COCH_3$) und Diacetyl $(CH_3CO)_2$ nachweisen lassen. Sie sind begleitet von Essig- und Propionsäure, CH_3COOH und CH_3CH_2COOH), während aus Kohlendioxyd und Wasserdampf unter wahrscheinlicher Zwischenbildung von Formaldehyd Ameisensäure (HCOOH) entsteht. — Ferner liefern Chloride, wie z. B. Chloroform- ($CHCl_3$) und Tetrachlorkohlenstoffdampf (CCl_4) eine ganze Reihe teils bekannter, teils noch nicht völlig erforschter, chlorierter Kohlenwasserstoffe und aus Kohlenoxyd und Ammoniak (NH_3) entstehen Stoffe, welche die Amidogruppe enthalten z. B. Glykokoll (Eiweißbildner). Unter Umständen lassen sich auch glatte Anlagerungen von Wasserstoff im Gemisch organischer Dämpfe mit demselben ausführen und dadurch Aldehyd oder Aceton in Alkohol oder Isopropyalkohol, Oelsäur ein Stearinsäure überführen, auch entsprechende Additionen von Sauerstoff finden bei dessen Gegenwart statt, z. B. von Form- und Acetaldehyd zu Ameisen- bezw. Essigsäure. Diese Stoffe entstehen auch aus einfachen gesättigten Verbindungen der Fettreihe, die ungesättigten Kohlenwasserstoffe derselben aber polymerisieren sich zum größten Teil zu den schon erwähnten unerquicklichen, hochmolekularen Stoffen, für die kaum Formel und Verhalten notdürftig bekannt sind. So entsteht z. B. aus Acetylen u. a. ein festes hornartiges Produkt von der mutmaßlichen Formel $C_{30}H_{26}$, welches Brom zu addieren und zu substituieren gestattet. Aethylen liefert flüssige Kohlenwasserstoffe.

Bemerkenswert ist die Fähigkeit einer großen Zahl organischer Stoffe, z. B. Alkohol oder Benzol, sogar fester, in den Entladungsraum gebrachter Cellulose, sich unter dem Einfluß der Effluvien mit Stickstoff zu vereinigen. Bei dem Alkohol verbindet sich der Stickstoff zunächst mit dem aus ersterem abgespaltenen Wasserstoff zu Ammoniak, welches dann mit den weiteren Umwandlungsprodukten des Alkohols, Formaldehyd und Fettsäuren, schließlich Hexamethylendetramin und Ammonsalze bildet. Wie schon bemerkt, scheint die Stickstoffaufnahme unter dem Einfluß hochgespannter Entladung ein allgemeineres Verhalten organischer Verbindungen zu sein, und da in der Natur solche Spannungen sehr wohl in der Atmosphäre oder zwischen Erdboden und Pflanzen und ersterer vorkommen können, hat man auch daraus geschlossen, daß der Stickstoff der Luft teils mit deren anderen Bestandteilen unter Umständen reagieren, teils vermittels dieser Spannungen von den Pflanzen und ihren organischen Bestandteilen aufgenommen werden könnte. Im Zusammenhang damit steht die weitere Vermutung, daß durch längere Zeit andauernd erzeugte künstliche hohe elektrische Tension, z. B. Ueberziehen der Felder mit einem unter hohem elektrischen Potential bestehenden Drahtnetz der Ertrag der Felder gesteigert werde (Elektrokultur).

Entladungen von enormer Spannungshöhe und Geschwindigkeit der Richtungsumkehr (Frequenz) vermögen ferner aus Stickstoff und Ammoniak z. B. Hydrazin (C_2H_4) zu bilden. Auch rasche Stärkeschwankungen elektrischer oder elektromagnetischer Kraftfelder sind zu Versuchen anwendbar, sowie sich auch noch andere, bisher kaum in Angriff genommene Möglichkeiten der Elektrizitätsausnutzung bieten.

4. Synthesen durch den galvanischen Strom und zwar Gleichstrom, da dem Wechselstrom spezifisch synthetische Wirkungen a) im Fall eines Angriffs der Elektroden zukommen. Dabei kann sich an beiden dasselbe Komplexsalz bilden (z. B. an solchen aus Kupfer in Cyankaliumlösung Kupfercyankalium, da Kupfer hier nicht wieder ausfällt). Ferner bei Abscheidung unlöslicher, z. B. schwefelhaltiger Verbindungen durch den Wechselstrom, b) bei gleichzeitiger Wirkung desselben mit Gleichstrom (Ueberlagerung) und dadurch erhöhter Ozonbildung z. B. (durch Schwefelsäureelektrolyse). Erfahrungsgemäß ist hier und in folgendem von wesentlichem Einfluß das Potential an den Elektroden, bestimmt durch deren Substanz, Vorbehandlung derselben, Beschaffenheit ihrer Oberfläche, Stromdichte, sowie die Natur der Lösung und der Vorgänge in derselben usw. (vgl. den Artikel „Elektrochemie" 23). Es ist unter Umständen möglich, durch konstante Haltung des Potentials auf bestimmter Höhe die gesamte chemische Stromarbeit auf die Erzeugung eines einzigen synthetischen Produkts hinzulenken. Vorgänge in der Lösung sind die Konkurrenz der eventuell katalytisch beschleunigten Geschwindigkeiten der Bildung entladener Ionen und ihrer

Reaktionen unter sich oder mit den anderen Substanzen der Lösung (sekundäre Reaktionen).

4a) Durch Zersetzung eines einzelnen Elektrolyten. Gemäß der Einleitung könnte man nach der Theorie, welche eine stoffliche Natur der Elektrizität (Elektron) annimmt, die Aufnahme einer elektrischen Ladung durch ein Ion an den Elektroden als Elektrosynthese auffassen, z. B. den Uebergang von Ferro- in Ferri-Ion, sicher aber die Vereinigung zweier entladener Wasserstoffionen (H) an der Kathode zu molekularem Wasserstoff (H_2), die Vereinigung zweier oder mehrerer entladener Anionen; desgleichen an der Anode, wie denn in dieser Art die elektrolytische Zersetzung von Salz-, Fluor-, verdünnter Schwefelsäure, durch die Bildung von gasförmigem Chlor, Fluor (dessen Darstellung elektrolytisch zuerst gelang) und Ozon aus den entsprechenden, entladenen Chlor- (Cl), Fluor- (F), [Hydroxyl- (OH) und] Sauerstoffanionen (O) vor sich geht. Oder im Fall komplexerer Ionen die in der elektrochemischen Industrie ausgeführte Erzeugung von perkohlensaurem Kalium (KO) OCO. OCO (OK) oder perschwefelsaurem Kalium $(KO)_2$-OSO.OSO_2(KO) und der entsprechenden Perschwefelsäure (bei Ersatz von K durch H) durch Elektrolyse des kohlen- oder schwefelsauren Kaliums (KO)OC(OK) oder (KO)O_2S-(OK) und der konzentrierteren Schwefelsäure (H_2SO_4). Hier darf man ebenfalls eine Vereinigung zweier entladener Ionen (KO)OCO— sowie (KO) O_2SO — oder (HO)O_2SO — zu den erwähnten Persalzen und der Persäure annehmen.

Was die anodische Synthese durch gemischte Elektrolyte betrifft, so läßt sich bei der gemeinsamen Elektrolyse von Hydrat und Chlorid der Alkalien, wie sie technisch bei der Darstellung von Bleichlaugen sich ausbildet, die Bildung von unterchloriger Säure (HClO) durch Vereinigung entladener Chlor- (Cl) und Hydroxylanionen (OH) annehmen, neben anderen Vorgängen. Das Unterchlorigsäureanion vermag in das Chlorat- und Perchloratanion noch weiter überzugehen und dadurch die industriell wichtigen Chlorsäure- und auch die Perchlorsäuresalze $MeClO_3$ und $MeClO_4$ zu liefern (Me = salzbildendes Element). Durch Elektrolyse verschiedener gemischter Metallsalzlösungen können unter Umständen Verbindungen der betreffenden Metalle auch an der Kathode in analoger Art sich bilden, ist doch dort die Entstehung von Legierungen festgestellt, z. B. von Kupfer und Zink (welche chemische Verbindung der beiden Elemente enthalten können) und zwar aus Kupfer und zinkhaltigen Lösungen.

Bei den organischen Verbindungen handelt es sich im wesentlichen um die Umsetzungen der an der Anode entladenen Anionen anorganischer Salze von organischen Säuren oder der Kationen (nach Elektrizitätsabgabe) der entsprechenden Salze organischer Basen (an der Kathode) im folgenden stets in wässerigen Lösungen, wo nichts anderes bemerkt wird.

Bezüglich des letzteren Falls der Salze organischer Basen ergibt z. B. die Elektrolyse des N-Benzylpyridiniumchlorids $C_5H_5N(CH_2C_6H_5)Cl$, die Vereinigung zweier chlorfreier Reste $C_5H_5N(CH_2C_6H_5)$ — nach Entionisierung derselben.

In bezug auf die entladenen Anionen erwähnter Säuresalze ist der einfachste Fall, der Zusammentritt zweier derselben, wie er z. B. bei den Salzen der schwefelhaltigen Säuren, aber auch bei denen der Thio-Aldehyde und Thio-Phenole vorkommt, z. B. bezüglich der Thioessigsäure $2CH_3COS$ — = CH_3.COS — SOC.CH_3 Diacetyldisulfid.

Auch andere als Säuresalze, z. B. Natriumverbindungen der Alkohole, überhaupt solche Salze, erhalten durch Ersatz eines Wasserstoffatoms durch Natriummetall, z. B. in den Methylenkomplex CH_2 gewisser organischer Verbindungen, können, meist in wasserfreiem Lösungsmittel elektrolysiert, Vereinigung zweier Anionen liefern, so z. B. bildet das Natriumsalz des Malonsäureesters $NaCH(COOC_2H_5)_2$ aus zwei entionisierten Resten —$CH(COOC_2H_5)_2$ den Aethantetrakarbonsäureester $[CH(COOC_2H_5)_2]_2$.

Oft aber spaltet sich bei dieser Vereinigung zweier Anionen I) ein Kohlendioxyd CO_2 ab oder II) deren zwei, und es entsteht durch diese erste Abtrennung ein Ester, durch die zweite im allgemeinen ein Kohlenwasserstoff, z. B. nach I bei der Elektrolyse des gelösten essigsauren Kaliums CH_3COOK ($2CH_3COO$ — ÷ CO_2 = CH_3COOCH_3 = Essigsäureinethylester). Dieser Ester kann sich auch in anderer Art aufbauen, indem z. B. zwei entionisierte Propionsäurereste $CH_3.CH_2.COO$ — Aethylen $CH_2:CH_2$ und Propionsäure $CH_3.CH_2.COOH$ liefern und letztere beiden vermögen sich zu propionsaurem Aethylester $CH_3.CH_2.COO.CH_2.CH_3$ zusammenzulagern.

II. Neben diesen Estergleichungen gilt für die Kohlenwasserstoffbildung aus dem essigsauren Salz $2CH_3.COO$ — ÷ $2CO_2$ = CH_3CH_3 (Aethan).

Diese Reaktionen finden sich zum Teil sehr verbreitet bei den einbasischen Fettsäuren, mit einer Karboxylgruppe COOH, die ungesättigten und substituierten derselben bilden die entsprechenden ungesättigten und substituierten Ester oder Kohlenwasserstoffe, vorausgesetzt, daß der Sub-

stituent keinen elektrolytisch abdissoziierbaren Bestandteil enthält oder vorstellt, z. B. die Karboxylgruppe. Ist aber diese verestert, z. B. ein Wasserstoffatom einer einbasischen Fettsäure durch ein Karboxethyl $-COOC_2H_5$ ersetzt, liegt also das entladene Anion des Monesters einer beliebigen Dikarbonsäure der Fettreihe vor, z. B. der Malonsäure $CH_2(COOC_2H_5)COO-$, so erhält man durch Addition zweier solcher endionisierter Reste (indem man das Kaliumsalz des Malonsäuremonesters elektrolysiert) unter CO_2-Abgabe nach der Kohlenwasserstoffgleichung II (s. oben) die Substanz $(-CH_2COOC_2H_5)_2$, d. h. bernsteinsaures Aethyl. Man kann also von einer beliebigen Dikarbonsäure, bezw. deren Monestersalz zu dem Ester einer kohlenstoffreicheren gelangen mit verdoppelter gerader Anzahl der CH_2-Gruppen in ihrem Kohlenwasserstoffradikal. Auch die Estergleichung I (s. oben) wird unter Umständen in analoger Art (wie II) erfüllt. Die Bildung eines ungesättigten Kohlenwasserstoffs bei den Fettsäuren (Aethylen aus Propionsäureanionen s. oben) führt hier zu den Estern ungesättigter Monokarbonsäuren.

Durch gemeinsame Elektrolyse der Salze zweier verschiedener einbasischer Fettsäuren können auch ganz analog wie bei der Kohlenwasserstoffgleichung II (s. oben) zwei gleiche entladene Anionen, so hier je ein Anion von einer der beiden Fettsäuren nach der Elektrizitätsabgabe unter Entlassung von Kohlendioxyd zu einem gemischten Kohlenwasserstoff zusammentreten. Wird das eine Fettsäuresalz durch das des Monesters einer Dikarbonsäure aus der Fettreihe ersetzt (die im besonderen Fall unter Umständen auch aromatisch substituiert sein kann), so entsteht der Ester einer kohlenstoffreicheren als der angewandten Fettsäure, z. B. $CH_3.COO- + CH_2.COOC_2H_5.COO-$. (Malonestersäureester) $\div 2CO_2 = C_2H_5.COOC_2H_5$ (Propionsäureäthylester).

Tritt schließlich an Stelle des zweiten Fettsäuresalzes ebenfalls das Monestersalz einer, von der schon eingetretenen verschiedenen Dikarbonsäure und zwar der Malonsäure, so enthält deren Anion nur eine CH_2-Gruppe, das der anderen aber mindestens ein CH_2 mehr im Kohlenwasserstoffradikal. Es entsteht also durch die Vereinigung je eines der beiderseitigen entionisierten Anionen (ganz analog der Elektrolyse eines einheitlichen Dikarbonsäuremonestersalzes) ein Dikarbonsäurediester aber mit ungerader Anzahl der CH_2 im Kohlenwasserstoffradikal.

Auch anorganische Anionen vermögen sich mit denen von organischen Fettsäuren zu vereinigen unter Bildung von z. B. anorganisch substituierten Kohlenwasserstoffen.

Können bei der Elektrolyse von organischen Salzen Hydroxylionen (etwa durch an der Kathode gebildetes Alkali oder bestimmte Zusätze) zur Anode gelangen, so tritt unter Umständen Vereinigung derselben mit den dort entladenen Anionen oder ihren Spaltstücken ein. So liefert essigsaures Kali z. B. mit Alkalikarbonat Methylalkohol ($CH_3COO - + HO \div CO_2 + CH_3OH$) und analog verhalten sich viele Säuren der Fettreihe, auch hydroaromatische.

Schließlich führt auch an der Kathode die gemeinsame Zerlegung eines substituierten Ammoniumjodids, z. B. des Phenyltrimethylammoniumjodids $C_6H_5N(CH_3)_3J$ mit einem passenden, Wasserstoff gleichfalls an der Kathode liefernden Salz durch vermutliche Vereinigung dieses Wasserstoffs mit dem Spaltstück C_6H_5 aus dem entladenen Ion des Alkyljodids $C_6H_5N(CH_3)_3-$ zur Bildung von C_6H_6, d. h. der Synthese des Benzols neben der des Trimethylamins $N(CH)_3$.

4b) Wirkung entladener Ionen auf die Lösung bezw. die Elektroden. An der Kathode sind es in der Hauptsache die Wasserstoffionen. Die zu untersuchende gelöste Substanz kann dieselben entweder selbst abscheiden oder man fügt einen Elektrolyten zu, der sie liefert. Zu dem ersteren Fall gehört z. B. die Bildung von Hydrosulfiten aus Sulfiten durch elektrolytischen Wasserstoff ($2NaHSO_3 + 2H = Na_2S_2O_4 + 2HO$).

Durch Umsetzung mit dem Lösungswasser können ferner an der Kathode aus elektrolytisch abgeschiedenem Metallen, z. B. Kalium, deren Hydroxyde (z. B. KOH) entstehen, ein Vorgang, der in großem Umfang technisch zur Darstellung der Alkalihydroxyde dient, daneben aber noch basische Salze u. a. liefern kann; als Beispiel für den Angriff der Elektroden ist ferner die kathodische Bildung von Tellurkalium zu betrachten mittels Elektrolyse von Kalilauge zwischen Tellurelektroden.

Bei den organischen Verbindungen reagiert im wesentlichen der elektrolytisch entwickelte Wasserstoff (fast immer des Zusatzelektrolyten) synthetisch. Daher sollten sich eigentümliche, von den Stromgrößen abhängige, synthetische Wirkungen an der Kathode zeigen. Dies trifft tatsächlich zu, da Kathoden mit Ueberspannung (vgl. den Artikel „Elektrochemie“ 21) teils unter sich verschieden, teils vorteilhafter arbeiten als rein chemisch, oder auf letztere Art anscheinend noch nicht bewirkte Synthesen liefern, indem sie selbst an der Reaktion teilnehmen. So entsteht z. B. aus Aceton $CH_3.COCH_3$

zunächst der Isopropylalkohol CH_3CHOH $.CH_3$ neben dem Pinakon $[CH_3C(OH)]_2$ und dem Pinakolin, daneben aber auch, bei Anwendung einer Bleikathode, Tetraisopropylblei $\left(\begin{matrix}CH_3\\CH_3\end{matrix}>CH\right)_4Pb$. Desgleichen können sich bei Anwendung von Kathoden aus Quecksilber organische Verbindungen dieses Metalls bilden. Weitere solcher Synthesen sind die Wasserstoffanlagerung an Alkaloide, an ungesättigte Verbindungen und zahlreiche solche, bei welchen die Hydrierung an der sogenannten CO-Atomgruppe oder der des Cyans CN-, der des Rhodans CNS- und anderen mehr angreift. Ferner kann schon die Veränderung der Stromgrößen, des Potentials Synthesen bringen.

Bei geringeren Stromdichten an Stelle hoher entsteht z. B. unter Umständen aus asymmetrischen Phenyltrichloraethan $C_6H_5CH_2$ $.CCl_3$ (an Stelle der sonst sich bildenden Dichlorverbindung durch Substitution von Wasserstoff für ein Chlor) durch Zusammentreten zweier nur entchlorten Reste ein substituiertes Butan $C_6H_5CH_2CCl_2.CCl_2.$ $CH_2C_6H_5$, dem weiterer Wasserstoff alles Chlor unter Bildung einer ungesättigten Substanz entzieht. Die rein chemische Reduktion aber ergibt andere Produkte. Außer Synthesen durch Anlagerung bezw. unter Beteiligung neuer Elemente (Metalle) oder durch Eintritt von Kondensation (in den zwei zuletzt erwähnten Fällen) können hier auch noch sekundäre Reaktionen synthetisch wirken. So entsteht aus Nitrobenzol $C_6H_5NO_2$ durch entladene Wasserstoffionen zunächst Nitrosobenzol C_6H_5NO, dann Phenylhydroxylamin C_6H_5NHOH und schließlich Anilin $C_6H_5NH_2$.

Desgleichen können alle diese Körper aufeinander einwirken. Von der Geschwindigkeit aller dieser Reaktionen des elektrolytischen Wasserstoffs, sowie seiner Reaktionsprodukte untereinander kann ja nach den Versuchsbedingungen eine so überwiegen, daß ihr Erzeugnis als Hauptprodukt auftritt. Man erhält also verschiedene Substanzen je nachdem z. B. mit verschiedenen Zusatzelektrolyten auch sogenannten Uebertragern (welche mit elektrolytisch aufgenommenen H, auch O reduzieren, bezw. oxydieren) gearbeitet wird, oder in alkalischer, neutraler, saurer oder stark saurer Lösung, mit Katalysatoren oder an Kathoden mit Ueberspannung. Als Synthese kann man z. B. die Gewinnung von Asoxybenzol $C_6H_5N-O-NC_6H_5$ in alkalischer Lösung betrachten, dadurch ermöglicht, daß hier die Verbindung von Phenylhydroxylamin mit Nitroso- oder Nitrobenzol zu dem Azokörper sehr rasch verläuft. Ersetzt man aber die alkalische Lösung durch eine solche von Kieselfluorwasserstoffsäure, so tritt eine Reaktion des Phenylhydroxylamins auf das Anilin auf, die zunächst zum para-Amidodiphenylamin $C_6H_5NH.C_6H_4NH_2$ führt, welches mit Nitrobenzol Phenylchinondiimid $C_6H_5N=C_6H_4=NH$ bezw. dessen Polymerisationsprodukt liefert.

Genau entsprechende Verhältnisse wie an der Kathode herrschen auch an der Anode, nur daß hier im wesentlichen Sauerstoff oder Chlor, Brom, Jod, Schwefel anlagernde oder einführende Anionen auftreten, oder Salzbildung an den Elektroden erfolgt. Der erste Fall umfaßt z. B. die Bildung von Chromsäure CrO_3 (neben gelöstem H_2CrO_4, auch $H_2Cr_2O_7$) aus schwefelsäurehaltigem Chromsulfat $Cr_2(SO_4)_3$, ferner von Alkalibromat (Alk.)BrO_3) aus Alkalihypobromit (Alk.)BrO), welche Synthese eine Oxydation des Hypobromitanions vorstellt. Auch die anodische Ozonbildung in verschieden konzentrierten Fluorsalzlösungen durch Einwirken des Fluorions auf das Lösungswasser ist vielleicht zu erwähnen. Was die Einwirkung auf die Elektrode selbst betrifft, so können hierbei Halogen-, ferner Schwefelmetalle, überhaupt Metallsalze, oft schwer, bezw. kaum darstellbare höherwertige synthetisiert werden, z. B. die des vierwertigen Bleies (Bleidisulfat $Pb(SO_4)_2$ und Plumbiphosphat) oder auch die des zweiwertigen, in Wasser praktisch unlöslichen, wie Chromat ($PbCrO_4$) ferner Bleiweiß (auch technisch) durch Zusatz eines Elektrolyten (außer dem die Säure des Salzes liefernden), dessen Anion mti dem Anodenmetall ein lösliches Salz bildet (vgl. den Artikel „**Elektrochemie**" **28**). Ferner können Sub- und Peroxyde gebildet werden, z. B. des Nickels (NiO und NiO_2) an einer Elektrode aus diesem Material, es entsteht an einer Eisenanode in Natronlauge eisensaures Natrium (Na_2FeO_4), aus Ferrochrom und Magankarbid als Elektroden Chromsäure und Permangansäure ($HMnO_4$), an einer Chromanode in Natriumsuperoxyd lösung rotes chromoetopersaures Natrium Na_3CrO_8 usf.

Bei den organischen Verbindungen gilt für die Salzbildung der Säuren Aehnliches. Wie es für den Wasserstoff an der Kathode möglich, so ist es auch für die elektrolytische Oxydation zu erreichen, daß diese völlig bei Innehaltung eines bestimmten Anoden potentials, in dem Maße als Faradays Gesetz, das sauerstoffhaltige (entladene) Ion liefert, zur Erzeugung eines einzigen Reaktions produkts verbraucht wird, z. B. zur Umwandlung von Acetylen in Ameisensäure ($C_2H_2 + 6\,OH = 2\,CH_2O_2 + 2\,H_2O$). Als bisher einzige elektrochemische Synthese,

ausgehend vom Kohlenstoff kann man ferner dessen anodische Umwandlung in verschiedenen Lösungen in z. T. komplizierte, organische Oxydationsverbindungen (z. B. auch stickstoffhaltige) auffassen. Daneben kommt noch in Betracht, die Bestandteile aus der Molekel herausnehmende und dadurch kondensierende Wirkung der entladenen sauerstoffhaltigen, aber auch der Chlor-Ionen. Bei den ersteren hat diese Wirkung auch technisch beachtete Anwendung zur Herstellung von Farbstoffen aus Basen und namentlich Oxysäuren gefunden, die der zweiten zeigt sich z. B. bei der Elektrolyse des geschmolzenen salzsauren Anilins ($C_6H_2NH_2.HCl$) durch Bildung von kompliziert zusammengesetzten, in der Färberei benutzbaren Indulinen neben anderen Substanzen. Auch Gemische organischer Substanzen können einheitliche Oxydationsprodukte liefern. Von Synthesen durch sekundäre Reaktionen ist schließlich die durch Abscheidung von Jod- oder Brom-Ionen viel glatter als rein chemisch bewirkte Jodoform- bezw. Bromoformerzeugung zu erwähnen. Es bildet sich hier in der Alkohol oder Aceton enthaltenden schwach alkalischen Lösung zunächst Kaliumhypojodid (Bromid) KJO(KBrO), wonach die Reaktion z. B. $3KJO + CH_3COCH_3 = CHJ_3$ (Jodoform) + CH_3COOK (Kaliumacetat) + 2KOH (Kalihydrat) einsetzt.

Kann man die Einwirkung von Kathoden auf Anodenprodukte noch als sekundäre Reaktionen ansehen, so führt die Elektrolyse z. B. des Salmiaks, welcher anodisch Chlor, kathodisch Ammoniak liefert, durch Einwirkung beider zum Chlorstickstoff, auch die technisch wichtige Darstellung von Bleichsalz aus Alkalichlorid beruht zum Teil auf der Vermischung von kathodisch gebildeter Alkalilauge mit anodisch entwickeltem Chlor. Trifft erstere auf ein anodisch gebildetes Metallsalz, so werden sehr reine Metallhydroxyde gefällt.

Literatur. ***F. B. Ahrens,*** *Handbuch der Elektrochemie, 2. Aufl. Stuttgart 1902.* — ***J. Billiter,*** *Die elektrochemischen Verfahren der chemischen Großindustrie, Bd. I und II. Halle a. S. 1909 und 1911.* — *Monographien über angewandte Chemie, herausgegeben von V. Engelhardt. Halle a. S. 1902.* — ***K. Elbs,*** *Uebungsbeispiele für die elektrolytische Darstellung chemischer Präparate.* — ***W. Loeb,*** *Die Elektrochemie der organischen Verbindungen, 3. Aufl. Leipzig 1911.* — ***A. Moser,*** *Die elektrolytischen Prozesse der organischen Chemie. Halle a. S. 1910.* — ***E. Müller,*** *Elektrochemisches Praktikum. Dresden und Leipzig 1913.* — *Unter Umständen kann weitere Auskunft bieten die von der Deutschen Bunsen-Gesellschaft seit 1894 herausgegebene Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte, physikalische Chemie, Halle a. S.*

C. Schall.

System der Pflanzen.

1. Wesen des Systems und Aufgabe der Systematik. 2. Geschichte des Pflanzensystems. 3. Systematische Einheiten. 4. Methoden der wissenschaftlichen Systematik. 5. Schwierigkeiten der wissenschaftlichen Systematik.

1. Wesen des Systems und Aufgabe der Systematik. Die ungeheure Formenfülle, in der das Pflanzenreich dem Menschen entgegentritt, hat schon frühzeitig das Bedürfnis nach einer Zusammenfassung der Einzelerscheinungen zu Kategorien höherer Ordnung und nach einer übersichtlichen Gruppierung dieser Kategorien hervorgerufen. Dieses Bedürfnis ist auch heute noch vorhanden und wächst mit der Häufung unserer Kenntnis von den Einzelformen.

Im Laufe der Zeit sind weitere Bedürfnisse hinzugetreten. Auf der einen Seite entstand der Wunsch nach einer derartigen Vervollkommnung der Uebersicht, daß es jederzeit möglich ist, eine beobachtete Pflanzenform mit einer schon bekannten zu identifizieren, d. h. zu „bestimmen" oder als neu zu erkennen; auf der anderen Seite entstand die Forderung, die enorme Arbeit der Unterscheidung und Klassifikation in den Dienst einer großen wissenschaftlichen Aufgabe zu stellen und diese Aufgabe war die Darstellung des entwickelungsgeschichtlichen Zusammenhanges der beobachteten Pflanzenformen.

Demgemäß definieren wir heute die Aufgabe des Systems der Pflanzen und der botanischen Systematik als „die Feststellung der Pflanzen, welche jetzt existieren, sowie derjenigen, welche in früheren Epochen der Erdentwickelung lebten und den Versuch, sie zu einem Systeme zu gruppieren, welches einerseits der wissenschaftlichen Forderung gerecht wird, eine Darstellung der entwickelungsgeschichtlichen Beziehungen der Pflanzen zueinander zu geben, andererseits dem praktischen Bedürfnisse nach Uebersicht entspricht" (Wettstein, Handbuch der systematischen Botanik 1901).

Insofern, als die Systematik bei Erfüllung dieser ihrer Aufgabe nicht nur eine Uebersicht über den Formenreichtum der Pflanzenwelt erfordert, sondern auch die Ergebnisse aller anderen botanischen Disziplinen zu verwerten hat, kann sie als die universellste Betrachtungsweise des Pflanzenreiches bezeichnet werden. Allerdings kann diese Universalität keineswegs jeder Art systematischer Betätigung zugesprochen werden; in wenigen anderen Disziplinen unterscheidet sich so häufig das Programm der Gesamtdisziplin von der Auffassung der Einzelarbeit. Nach dem Gesagten ist der

Zustand des Pflanzensystems auch jeweils der kurze Ausdruck des Standes der Kenntnisse auf dem Gebiete der Botanik überhaupt.

2. Geschichte des Pflanzensystems. Aus der gegebenen Definition der Aufgabe des Systems ergibt sich schon, daß der Aufbau desselben nicht gleichbleibend sein kann, daß es nicht bloß ein System gibt, sondern daß die fortgesetzten Umgestaltungen des Systems im günstigsten Falle Annäherungsversuche an ein Ideal darstellen. Das Pflanzensystem hat sich allmählich herausgebildet und diese Entwickelung war keine so einfache und leichte. Nicht allein, daß das Programm erst allmählich entstand; der Ausbau des Systemes setzte erst eine Einigung über die Schaffung der systematischen Kategorien und ihre Benennung, eine Klarstellung der morphologischen Begriffe und ihrer Wertigkeit und viele Erfahrungen voraus, die selbst wieder das Ergebnis einer langen und komplizierten Entwickelung waren.

Nur soweit es im Rahmen dieses Werkes möglich ist, sollen die Hauptzüge der Geschichte des Systems der Pflanzen hervorgehoben werden.

Aus der Definition der Aufgabe ist schon zu entnehmen, daß die Systematik zwei ganz verschiedene Zwecke anstrebt, einerseits die Schaffung einer Uebersicht, andererseits den Ausdruck einer wissenschaftlichen Erkenntnis. Diesen beiden Aufgaben entsprechend teilt man gewöhnlich die Systeme in künstliche und natürliche ein, wobei die ersteren nur die Uebersicht, die letzteren Uebersicht und Erkenntnis bieten sollen. Diese Einteilung ist praktisch brauchbar, sie ist aber nicht geeignet, die historische Entwickelung zu charakterisieren, was am besten daraus hervorgeht, daß gerade einige Systeme, welche die erwähnte Erkenntnis anstrebten, zu den künstlichsten zählen, daß andererseits das natürliche System in seinen Anfängen schon zu einer Zeit entstand, in der man an einen entwickelungsgeschichtlichen Zusammenhang zwischen den Pflanzenformen noch nicht dachte. Um das zu verstehen, braucht man nur in Betracht zu ziehen, daß die Schaffung großer Kategorien entwickelungsgeschichtlich zusammengehörender Organismen durchaus nicht das Ergebnis einer wissenschaftlichen Erkenntnis zu sein braucht, sondern dem unbefangenen Beobachter sich von selbst ergibt. Schon das Volk hat Gruppen wie Gräser, Farne, Palmen, Moose, Flechten u. a. unterschieden, geradeso wie einige der wichtigsten großen Gruppen der zoologischen Systematik sich mit volkstümlichen Bezeichnungen nahezu decken. Daß solche Zusammenfassungen ein geschulter Naturbeobachter in viel weiterem Maße vorzunehmen vermag, ist zweifellos und dies macht es verständlich, daß schon lange vor dem Durchdringen der Deszendenzlehre die Systematiker in ihrem Suchen nach dem richtigen Einteilungsprinzipe dem Ziele zusteuerten, das uns heute noch vor Augen steht. Wenn wir daher von den ältesten botanischen Schriftstellern absehen, so läßt sich die Tätigkeit der meisten Botaniker in der Zeit vor Linné, also bis zur Mitte des 18. Jahrhunderts charakterisieren als das Suchen nach dem Einteilungsprinzipe, welches dem instinktiv gefühlten natürlichen Zusammenhange der Formen am besten entspricht. Je weniger der einzelne dabei theoretisch überlegte, desto mehr trug er dem richtigen instinktiven Eindrucke Rechnung, was am deutlichsten aus dem Schicksale A. Caesalpins (1519 bis 1603) hervorgeht, der wie keiner seiner Zeitgenossen theoretisch die Prinzipien der Systematik zu erkunden trachtete, dabei für die Botanik überhaupt ganz Hervorragendes leistete, aber ein System schuf, welches heute als durchaus künstlich bezeichnet werden muß.

Das große Verdienst C. Linnés (1707 bis 1778) besteht darin, daß er erkannte, daß in der Tätigkeit der Systematiker ein Zwiespalt besteht. Darum schuf er den Vorversuch („Fragmentum") eines natürlichen Systems („Methodus naturalis") mit 62 Gruppen, unter denen sich solche finden, die wir heute noch als durchaus natürliche ansehen (Papilionaceae, Cucurbitaceae, Cruciferae, Asperifoliaceae, Umbelliferae, Compositae u. a.), und präzisierte seine Stellungnahme zum natürlichen Systeme in den Worten: „Methodi naturalis fragmenta studiose inquirenda sunt. Primum et ultimum hoc in Botanicis desideratum est" (Philosophia botanica, p. 27). Daneben schuf er in klarer Erkenntnis, daß die Zeit zum Ausbau des natürlichen Systems noch nicht gekommen sei, sein Sexualsystem, daß der Uebersicht und Klarheit dienen sollte. Dieses letztere mit seinen bekannten 24 Klassen hat sich lange erhalten und als rein künstliches System zu einer ganz falschen Einschätzung der wissenschaftlichen Anschauungen Linnés geführt.

In der Zeit nach Linné nahmen die Versuche, das System nach der „natürlichen Verwandtschaft" auszubauen, ihren Fortgang. Das oben Gesagte macht es verständlich, daß diese Versuche in ihren Ergebnissen ganz wertvoll sein konnten, obwohl man sich zunächst über das Wesen dieser „natürlichen Verwandtschaft" durchaus nicht im klaren war. Diese Klärung trat erst um die Mitte des 19. Jahrhunderts ein, als unter dem Einfluße Ch. Darwins und seiner Zeitgenossen die Erforschung der

Phylogenie eine der obersten Aufgaben der biologischen Forschung wurde. Erst von dieser Epoche ab kann man daher von phylogenetischen Systemen sprechen, während es zweckmäßig sein dürfte, die natürlichen Systeme der vorhergehenden Zeit als morphologische zu bezeichnen, da sie im wesentlichen auf dem morphologischen Vergleiche beruhten.

Die erste bedeutende Förderung des natürlichen Systems in der nachlinnéischen Zeit erfolgte durch A. L. de Jussieu (1748 bis 1838). Das Erscheinen seines systematischen Hauptwerkes (Genera plantarum secund. ordines natur. 1789) kennzeichnet den Moment, von dem ab von einem konsequenten planmäßigen Ausbau des natürlichen Systems gesprochen werden kann.

Die folgende Uebersicht zeigt nicht bloß die großen Hauptgruppen des Jussieuschen Systems, sondern auch die Grundzüge einiger der wichtigsten Systeme der Folgezeit, auf diese Weise gewissermaßen durch Vorführung der wichtigsten Etappen die allmähliche Veränderung der Anschauungen zum Ausdrucke bringend. Selbstverständlich kann es sich hier nur um Vorführung einer Auswahl von Systemen handeln; ohne Vollständigkeit anzustreben, sei hier noch einiger Systeme und Werke gedacht, welche entweder zeitweise viel Anklang fanden oder sonst wesentlich fördernd auf die Entwickelung der Systematik wirkten, so des Systems von H. G. L. Reichenbach (1793 bis 1879)[1], jenes von J. Lindley (1799 bis 1856)[2], der grundlegenden Werke von G. Bentham und J. D. Hooker (Genera plantarum, 1862 bis 1883), H. Baillon (Histoire des plantes, 1867 bis 1894), E. Warming (Handb. i. den syst. Bot., 2. Aufl. deutsch von Knoblauch 1898) u. a.

In der Unterscheidung der Monokotyledonen und Dikotyledonen, in der Gesamtanordnung der großen Abteilungen, ferner in der in der Uebersicht nicht zur Geltung kommenden geschickten Umgrenzung vieler Familien liegt die Bedeutung der Leistung Jussieus. Ein Verdienst A. P. de Candolles (1778 bis 1841)[3] war die Unterscheidung der Zell- und Gefäßpflanzen und die Abgrenzung der Thallophyten (als Aphyllae). H. Endlicher (1804 bis 1849) stellte[4] den prinzipiell wichtigen Gegensatz zwischen Thallophyten und Cormophyten fest, er erkannte die Zusammengehörigkeit jener Pflanzen, die wir heute als Archegoniaten im engeren Sinne bezeichnen; in der Präzisierung der Familien übertraf er alle Vorgänger.

Gering ist der Fortschritt, den A. Brongniart (1801 bis 1847) einleitete[1], jedoch erlangte die von ihm durchgeführte Unterscheidung in Cryptogamen und Phanerogamen Anerkennung bis auf den heutigen Tag. Al. Braun räumte erst den Gymnospermen die richtige Stellung und Bedeutung im Systeme ein[2], Ad. Eichler brachte die abgeleitete Stellung der Sympetalen zur Geltung[3]. Die späteren, allgemeiner angenommenen Systeme bringen in bezug auf die großen Gruppen der Blütenpflanzen keine wesentlichen Aenderungen, abgesehen davon, daß nach dem Vorgange O. Drudes u. a. die unnatürliche Einschaltung der Monokotyledonen zwischen die Gymnospermen und Dikotyledonen mehrfach aufgehoben erscheint. Dagegen machen sich wesentliche Aenderungen in der Auffassung des Systems der Thallophyten bemerkbar.

Zahlreiche Detailuntersuchungen auf dem Gebiete der Thallophyten, welche die letzten Jahrzehnte des 19. Jahrhunderts brachten und welche zum großen Teile auf die Anregungen zurückzuführen sind, welche Männer wie A. de Bary, F. Cohn, J. Sachs, S. Schwendener, J. Pringsheim gaben, bewiesen immer mehr, daß es unmöglich ist, die Gesamtheit der Thallophyten als Glieder einer Entwickelungsreihe aufzufassen; ebenso hat es sich gezeigt, daß die Einteilung der Thallophyten in Algen und Pilze eine ökologische, aber keine phylogenetische ist. Die Unterscheidung von großen, voneinander entwickelungsgeschichtlich unabhängigen Gruppen der Thallophyten (Wettstein, Engler) war die Folge dieser Erkenntnisse. Schon 1896 hatte Sachs[4] auf die Wahrscheinlichkeit hingewiesen, daß sich im Pflanzenreiche mehrere solche Gruppen unterscheiden lassen (Architypen), daß mithin die Entwickelung des Pflanzenreiches in diesem Sinne eine polyphyletische sei. Auch J. P. Lotsy[5] und F. Oltmanns[6] haben in ihren zusammenfassenden Werken, und F. Rosen[7] in einer beachtenswerten Studie eine polyphyletische Entwickelung des Pflanzenreiches angenommen.

[1]) Uebersicht des Gewächsreiches, 1828.
[2]) An introduct to the nat. Syst., 1830.
[3]) Théorie elementaire. 2. Ed. 1819.
[4]) Genera plantarum secund. ord. nat. 1836 bis 1843.

[1]) Enumération des genres cult. au Mus. d'hist. d. Paris. 1843.
[2]) P. Ascherson, Flora der Provinz Brandenburg. 1864.
[3]) Syllabus d. Vorles. über spezielle u. mediz.-pharm. Botanik. 1. Aufl. 1876, 4. Aufl. 1886.
[4]) Flora, 82. Bd. 1896.
[5]) Vorträge über bot. Stammesgeschichte. I. 1907, II. 1909, III. 1911.
[6]) Morphologie und Biologie der Algen. I. 1904, II. 1905.
[7]) Studien über d. natürl. System d. Pfl. in Cohns Beitr. z. Biol. d. Pfl. 1902.

A. L. de Jussieu. 1789	A. P. de Candolle.[1] 1819	St. Endlicher 1836–1843	A. Brongniart. 1843	A. Braun. 1864	A. Eichler. 1883	R. v. Wettstein.[2] [illegible]	A. Engler.[3] [illegible]
	III Acotyledoneae	I Thallophyta	I Cryptogame	I Bryophyta	I Cryptogamae	I Myxophyta	I Schizophyta
						II Schizophyta	II Phytosarcodina
							III Flagellatae
							IV Dinoflagellatae
		1 Protophyta				III Zygophyta	V Bacillariales
	2 Aphyllae		1 Amphigènes	1 Thallodea	1 Thallophyta		VI Conjugatae
I Acotyledones		2 Hysterophyta					VII Chlorophyceae
							VIII Charales
						IV Phaeophyta	IX Phaeophyceae
						V Rhodophyta	X Rhodophyceae
	1 Foliaceae					VI [illegible]	XI [illegible]
	II Monocotyledoneae	II Cormophyta		2 Thallophyllodea	2 Bryophyta	VII Cormophyta	
	2 Cryptogamae	1 Acrobrya	2 Acrogènes			1 Archegoniatae	XII [illegible]
				II Cormophyta	3 Pteridophyta	A Bryophyta	[illegible]
						B Pteridophyta	[illegible]
II Monocotyledones	1 Phanerogamae		II Phanérogames	III Anthophyta	II Phanerogamae	2 Anthophyta	XIII Embryophyta siphonogama
III Dicotyledones	I Dicotyledoneae	2 Amphibrya	1 Monocotylédones	1 Gymnospermae	1 Gymnospermae	A Gymnospermae	1 Gymnospermae
A Monoclinae	4 Monochlamydeae	3 Acramphibrya	2 Dicotylédones	2 Angiospermae	2 Angiospermae	B Angiospermae	2 Angiospermae
a Apetalae		1 Gymnospermae	A Angiospermes	A Monocotyleae	A Monocotyleae	a Dicotyledones	A Monocotyledoneae
b Monopetalae	3 Corolliflorae	2 Apetalae	a Gamopétales	B Dicotyleae	B Dicotyleae	α Choripetalae	B Dicotyledoneae
c Polypetalae	2 Calyciflorae	3 Gamopetalae	b Dialypétales	a Apetalae	a Choripetalae	β Sympetalae	a Archichlamydeae
				b Sympetalae			
B Diclinae	1 Thalamiflorae	4 Dialypetalae	B Gymnospermes	c Eleutheropetalae	b Sympetalae	b Monocotyledones[3]	b Metachlamydeae

[1]) Zur Erleichterung der Uebersicht wurde das System in verkehrter Anordnung mitgeteilt; die von De Candolle getroffene Anordnung ist aus der beibehaltenen Numerierung zu entnehmen.
[2]) Erste Darstellung im Jahre 1896.
[3]) Das Englersche System wurde hier so dargestellt, wie es in seiner neuesten Fassung (Syllabus, 6. Aufl. 1909) erscheint. Die Grundzüge des Systemes sind, speziell in Beziehung auf die Embryophyta schon in den früheren Auflagen desselben Werkes zu finden.

In neuerer Zeit haben Ph. van Tieghem (Bull. d. l. soc. bot. de France 1897) und H. Hallier (zahlreiche Arbeiten seit 1903, zuletzt in L'origine et le système phylétique des Angiospermes, Arch. Néerland 1912) tiefer greifende Reformen des Systemes der Blütenpflanzen versucht. Die Arbeiten des ersteren basierten auf eingehenden Untersuchungen, führten aber infolge einseitiger Verwendung des Samenanlagenbaues zu einem ganz künstlichen Systeme, die des letzteren streben eine Vertiefung des Systems in phylogenetischer Hinsicht an, ohne aber im allgemeinen bisher zu definitiven Resultaten gelangt zu sein.

3. **Systematische Einheiten.** Zum Zwecke der Schaffung einer Uebersicht über die Fülle von Pflanzenformen geht die Systematik von der Beobachtung der einzelnen Pflanzenindividuen aus und schafft durch Zusammenfassung der Individuen von einer gewissen Gleichförmigkeit systematische Einheiten („Sippen" nach Naegeli), in gleicher Weise werden diese Einheiten auf Grund größerer oder geringerer Uebereinstimmung zu Einheiten (Sippen) höheren Ranges zusammengefaßt, denen die ersteren subsumiert werden usw. Es liegt in der Natur der Sache, daß die Zahl der möglichen Abstufungen dieser Einheiten eine unbegrenzte ist, daß andererseits eine zuweitgehende Unterscheidung solcher Abstufungen dem Zwecke der Uebersichtlichkeit entgegenarbeitet. So hat man sich auf eine gewisse Anzahl von solchen systematischen Einheiten geeinigt, mit der die Praxis der Systematik zu arbeiten vermag. Diese Einheiten sind (von der umfassendsten bis zur engsten angeordnet): Divisio (Abteilung), Classis (Klasse), Ordo (Ordnung), Familia (Familie), Tribus, Genus (Gattung), Sectio (Sektion), Species (Art), Varietas (Varietät) und Forma (Form). Eine Bereicherung der Zahl der Einheiten ergibt sich durch Einschaltung von Subdivisio (Unterabteilung) zwischen Divisio und Classis und analoger Bildung der Einheiten: Subclassis, Subordo, Subfamilia, Subtribus, Subgenus, Subsectio, Subspecies usw.[1])

Es muß stets daran festgehalten werden, daß diese Einheiten keine in der Natur gegebenen Erscheinungen sind, sondern daß es sich durchweg um Abstraktionen handelt. Die Folge davon ist, daß bei Umgrenzung der Einheiten den persönlichen Anschauungen, der Wirkung der Tradition, andererseits dem wissenschaftlichen Takte ein großer Spielraum eingeräumt werden muß. Vom Standpunkte der phylogenetischen Systematik muß verlangt werden, daß die Einheiten entwickelungsgeschichtlich zusammengehöriges umfassen, bezw. im großen und ganzen Abschnitte der Entwickelung markieren, woraus sich von selbst die Unmöglichkeit der Umkehrung oder Umstellung in der Anordnung der Einheiten ergibt.

Am ehesten wird sich für die untersten Einheiten des Systems die Möglichkeit einer Definition erwarten lassen, da diese aus der direkten Beobachtung der Individuen abgeleitet werden. Eine auch nur einigermaßen feststehende Definition dieser Einheiten würde auch einem wissenschaftlichen Bedürfnisse entsprechen, da mit diesen Begriffen die Botanik täglich arbeitet und daher eine möglichste Gleichheit in der Weite der Begriffe im Interesse der gegenseitigen Verständigung liegt. Darauf ist der Streit über das Wesen der Art (Species) zurückzuführen, der lange Zeit in der Geschichte der Systematik eine große Rolle spielte. Trotzdem ist es bis heute nicht zu einer allgemein angenommenen Definition der Art gekommen. Das ist ganz begreiflich. Ganz abgesehen von der prinzipiellen Schwierigkeit, die Grenzen für eine Abstraktion durch Worte zu fixieren, spielen da ebenso Abstufungen im Beobachtungs- und Unterscheidungsvermögen, Verschiedenheiten im Umfange und in der Beschaffenheit des Beobachtungsmaterials eine Rolle, wie ganz berechtigte Bedürfnisse. Die Unterscheidung der Arten muß ganz anders ausfallen, wenn es sich bloß um eine beiläufige zusammenfassende Bezeichnung einer Summe von Einzelerscheinungen (Vegetationsschilderung, erste kursorische Bearbeitung einer Landesflora, Bezeichnung einer Pflanze im praktischen Leben u. dgl.) handelt oder um die Feststellung der letzten systematischen Einheiten als Material für eine wissenschaftliche Untersuchung. Damit hängt es auch zusammen, daß der Speciesbegriff bei verschiedenen Botanikern, ja bei den Angehörigen verschiedener Schulen oder Länder von ganz verschiedener Weite ist. Ein Botaniker, welcher die reichen Einläufe eines großen Institutes nur zum Zwecke baldiger Einreihung bearbeitet oder die erste Uebersicht über die Flora eines wenig erforschten Landes gibt, wird selbstverständlich mit einem anderen Speciesbegriff arbeiten, als der Botaniker, welcher für die monographische Bearbeitung einer Gattung zunächst auf induktivem Wege die systematischen Einheiten festzustellen trachtet oder Detailuntersuchungen auf dem Gebiete einer wohldurchforschten Flora vornimmt.

Für den wissenschaftlich arbeitenden Systematiker ist diese verschiedene Weite des Speciesbegriffes auch kein allzugroßes Hindernis, weil es diese meist richtig einzu-

[1]) Vgl. J. Briquet, Règles internation. d. l. nomenclature bot. 1912; ebendort alles die Bezeichnungsweise der Sippen Betreffende.

schätzen weiß; hemmend wirkt für ihn nur die Verwendung verschiedenartiger Speciesbegriffe durch Autoren, welche sich der verschiedenen Weite der von ihnen verwendeten Begriffe nicht bewußt sind oder solche verschiedenwertige Begriffe ohne wissenschaftlichen Zweck nur aus Gründen der Bequemlichkeit oder Tradition anwenden. In Büchern, welche für den Unterricht oder für weitere Kreise bestimmt sind, sollte aber auf tunlichst einheitliche Fassung des Speciesbegriffes geachtet werden.

Eine Definition der „Art", die vielleicht am ehesten allgemeine Verwendbarkeit besitzt, hat A. v. Kerner[1]) gegeben. Er bezeichnet als Art den „Inbegriff aller über ein bestimmtes Areale verbreiteter gleichförmiger und sich durch längere Zeit in der Mehrzahl ihrer Nachkommen gleichförmig erhaltender Individuen". Allerdings können hierbei wieder die Ausdrücke „gleichförmig" und „längere Zeit" verschiedene Interpretation erfahren, aber dies liegt in der Natur der Sache.

Einen größeren Grad von Präzision werden wir von einer phylogenetischen Systematik bei der Umgrenzung der dem Speciesbegriffe subsumierten Einheiten erwarten können. Als Subspecies oder Rasse werden wir Einheiten bezeichnen, denen im allgemeinen die Kennzeichen der Species zukommen, die aber nach unserer Auffassung sich aus einem Formenkreise, den wir als Art bezeichnen, herausgebildet haben. Wir können den Namen „Varietät" für die Bezeichnung jener geringeren aber doch noch einen gewissen Grad von Erblichkeit aufweisenden Abänderungen vom Speciestypus reservieren, welche auf die direkte Einwirkung der Außenfaktoren der Umgebung zurückführbar sind; die Bezeichnung Mutation kann für vererbbare durch Heterogenese entstandene Abweichungen verwendet werden, während der indifferente Ausdruck „Variation" in allen Fällen gebraucht werden kann, in welchen über das Wesen der Abweichung sich nichts sagen läßt. Der oft gebrauchte Ausdruck „Form" wird am besten für die Bezeichnung von Abweichungen und Stadien reserviert bleiben, welche noch in den normalen Entwickelungszyklus fallen; während als Aberrationen Abweichungen pathologischer Art bezeichnet werden. Die moderne experimentelle Vererbungslehre hat Termini geschaffen, die zur unzweideutigen Bezeichnung von Einheiten nötig sind, die aber zum größten Teile über den Rahmen der systematischen Aufgabe hinausgehen, so die Bezeichnungen Biotyp, Linie, Halbrasse, Mittelrasse usw.

[1]) Abhängigkeit der Pflanzengestalt v. Klima u. Boden. S. 46.

4. Methoden der wissenschaftlichen Systematik. Die Methodik jeder Wissenschaft muß sich nach ihrer Aufgabe richten. Wenn die Systematik die Aufgabe hat, den entwickelungsgeschichtlichen Zusammenhang der Organismen zur Darstellung zu bringen, so muß sie sich aller Methoden bedienen, die wir anwenden können, um Rückschlüsse auf jenen Zusammenhang zu ziehen. Die Methoden werden verschieden sein müssen, je nachdem, ob es sich um die Aufklärung des Zusammenhanges der größeren Gruppen des Pflanzenreiches handelt oder um die Verwandtschaft jener letzten Ausstrahlungen der Entwickelungsreihen, welche heute noch die Erdoberfläche bewohnen.

Wären alle die Pflanzenformen, welche einst die Erde bewohnten, in den Ablagerungen der Erdrinde in ununterbrochener Schichtenfolge fossil erhalten, so wäre die Phytopaläontologie die wichtigste Hilfswissenschaft der Systematik. Leider trifft die Voraussetzung nicht zu; die paläontologische Ueberlieferung ist dürftig und schwer lesbar. Trotzdem darf die Bedeutung der phytopaläontologischen Forschung nicht unterschätzt werden, sie hat schon wichtige Lücken des Systems ausgefüllt; es sei nur auf die in neuerer Zeit klargestellte fossile Gruppe der Cycadofilicineen hingewiesen, welche den Uebergang von den Pteridophyten zu den Gymnospermen vermittelte und deren Kenntnis die Systematik dieser Gruppen wesentlich beeinflußte.

Die wichtigste und stets anwendbare Methode der Systematik ist die vergleichende Morphologie (inkl. Entwickelungsgeschichte); allerdings verträgt sie keine mechanische Anwendung, sondern verlangt eine entsprechende Vertiefung. Wenn ihre Anwendung auch auf der allgemeinen Anschauung beruht, daß morphologische Aehnlichkeit der Ausdruck einer Verwandtschaft ist, so verlangt sie doch scharfe Unterscheidung zwischen Aehnlichkeiten, die auf gemeinsamer Abstammung beruhen (Homologien), und solchen, welche auf analoge Anpassungen zurückzuführen sind (Analogien, Konvergenzerscheinungen); sie verlangt nicht bloß Aufdeckung von Homologien im normalen äußeren Aufbau, sondern auch jener, die im histologischen Bau (anatomische Systematik)[1]), im Ver-

[1]) L. Radlkofer, Ueber d. Methoden in d. bot. Syst., insb. d. anat. Methode 1883. — H. Solereder, System. Anatom. d. Dicot. 1899, Ergänzungsband 1908. — O. Porsch, Der Spaltöffnungsapparat im Lichte d. Phylog. 1905. — J. P. Lotsy, Ueb. d. Einfl. d. Cytologie auf die Syst., Result. scient. d. Congr. int. d. Bot. 1905.

laufe des Befruchtungsvorganges und der Embryogenie, in dem Verhalten von Jugendformen[1]) und in dem gelegentlichen Vorkommen von Bildungsabweichungen sich äußern. Auch die physiologische Chemie hat schon wertvolle systematische Aufklärungen gegeben und läßt noch eine viel weiter gehende systematische Verwertung erwarten. Bei der Aufdeckung der verwandtschaftlichen Beziehungen zwischen den jüngsten systematischen Einheiten, der Arten und ihrer Untersippen, hat die Pflanzengeographie (geographische Systematik)[2]) wichtige Dienste geleistet und hier kann auch das Experiment (experimentelle Systematik) mit Aussicht auf Erfolg einsetzen.

5. Schwierigkeiten der wissenschaftlichen Systematik. Die botanische Systematik hat mit großen inneren und äußeren Schwierigkeiten zu kämpfen, die hier kurz behandelt werden sollen, weil sie manche Schwächen, die dieser Wissenschaft anhaften, verständlich machen können und zugleich einen Ausblick auf ihre künftige Entwickelung geben.

Die Schwierigkeiten liegen vor allem in der Verbindung von zwei ganz verschiedenen Zielen, eines praktischen und wissenschaftlichen (vgl. Abschnitt 1). Es wäre zunächst zu erwägen, ob diese Verbindung überhaupt möglich ist. Die Darstellung der phylogenetischen Beziehungen arbeitet auf eine Rekonstruktion von Entwickelungsreihen hin, die möglichst lückenlos die Verbindung zwischen den Pflanzentypen herstellen sollen; ihr größter Erfolg liegt in der Ueberbrückung von Unterschieden, in der Aufdeckung des Gemeinsamen zwischen verschieden erscheinenden Typen; die systematische Uebersichtlichkeit verlangt dagegen möglichste Hervorhebung der Unterschiede und des Trennenden. Die phylogenetische Entwickelung vollzog sich in einer immer größer werdenden Zahl von nebeneinander verlaufenden Entwickelungsreihen; die systematische Darstellung verlangt eine Aufeinanderfolge der unterschiedenen Typen. Der allergrößte Teil des Stammbaumes des Pflanzenreiches ist abgestorben, die heute lebenden Pflanzen stellen nur die äußersten Verästelungen dar; indem das System größtenteils auf die heute lebenden Pflanzen begründet und gezwungen ist, verschwundene Typen durch ihre Deszendenten vertreten zu lassen, entsteht zu leicht das Mißverständnis, daß letztere von relativ hohem phylogenetischem Alter sind.

Aus diesen Erwägungen folgt, daß das System niemals ein wirklich getreues Bild der phylogenetischen Entwickelung wird geben können; immerhin wird es sich aber zur beiläufigen Darstellung der Phylogenie verwenden lassen, wenn man sich der verschiedenen Ansprüche, welche Wissenschaft und Zweckmäßigkeit an das System stellen, bewußt ist und das System dementsprechend richtig interpretiert.

Solange das System beiden Aufgaben zugleich zu dienen hat — und vorläufig ist ein anderer Weg nicht auffindbar —, wird man damit rechnen müssen, daß manche phylogenetischen Erkenntnisse sich im Systeme nicht entsprechend ausdrücken lassen, man wird andererseits eine Abschwächung der Uebersichtlichkeit des Systems als eine Folge des Ausdruckes wissenschaftlicher Erkenntnisse mit in Kauf nehmen. In solchen Fällen aber, in denen die Unvereinbarkeit beider Standpunkte schroff hervortritt, wird eine Trennung beider Aufgaben im Interesse beider liegen.

Abgesehen nun von diesen Schwierigkeiten prinzipieller Art hat der Vereinigung der beiden Aufgaben die Systematik noch andere Uebelstände zur Folge.

Zunächst hat das Streben der Darstellung wissenschaftlicher phylogenetischer Erkenntnis unangenehme Konsequenzen für das System als Mittel der Uebersicht. Die Versuche, Erkenntnisse ersterer Art systematisch zu verwerten, müssen naturgemäß eine fortwährende Umgestaltung des Systems zur Folge haben. Diese Unannehmlichkeit ist nicht zu vermeiden; sie verlangt von der wissenschaftlichen Forschung nur insofern Takt, als eine Erkenntnis nicht früher systematisch verwertet werden soll, als sie soweit als möglich sichergestellt ist. Ein der Praxis dargebotenes System soll kein Experiment zum Ausprobieren einer Theorie, sondern ein möglichst sichergestelltes Ergebnis darstellen.

Wie schon oben erwähnt, hat der Ausbau des Systems nach phylogenetischen Gesichtspunkten vielfach eine Abschwächung der Unterscheidungsmerkmale zur Folge. Je mehr wir natürliche Entwickelungsreihen konstruieren können, desto schwieriger muß es sein, durchgreifende Unterschiede zwischen den Gruppen festzustellen. Ein Beispiel wird dies illustrieren. Solange der Generationswechsel der Gymnospermen nicht aufgeklärt war, solange man die fossilen Uebergangsformen zwischen Pteridophyten und Gymnospermen nicht kannte, war es leicht, die Unterschiede zwischen diesen beiden großen Gruppen anzugeben, ja gerade zwischen diese beiden Gruppen fiel eine der Hauptscheide-

[1]) K. Goebel, Ueb. d. Jugendzustände d. Pfl. Flora 1889. — L. Diels, Jugendformen u. Blütenreife, 1906.

[2]) R. v. Wettstein, Grundzüge d. geograph.-morphol. Methode, 1898.

wände des Systemes. Heute ist es geradezu schwer, die Unterschiede zwischen den genannten Gruppen zu präzisieren. Diese Schwierigkeit fällt gegenüber dem wissenschaftlichen Gewinne weniger ins Gewicht, wenn beachtet wird, daß es nicht an und für sich Zweck des Systems ist, die Mittel zu bieten, um einen Organismus an der richtigen Stelle „einzureihen", ihn zu „bestimmen", daß dieser Zweck auf anderem Wege erreicht werden kann.

Schwerwiegender sind die Schwierigkeiten, welche der Durchführung der wissenschaftlichen Aufgaben der Systematik aus der praktischen Handhabung derselben erwachsen.

Da ist zunächst zu beachten, daß an der Ausgestaltung des Systems zahlreiche Botaniker mitarbeiten — und zwar höchst erfolgreich —, denen es ganz ferne liegt, an dem Ausbau der phylogenetischen Erkenntnis mitzuwirken. Geradeso, wie nach dem früher Gesagten an der Konstruktion des „natürlichen" Systems schon zu einer Zeit gearbeitet wurde, in der man sich über die „natürliche Verwandtschaft" keine klaren Gedanken bildete, geht es noch heute. Die Systematik hat eine gewisse Methodik (Unterscheidung, Beschreibung und Benennung der Sippen, deren Subsumierung u. dgl. — Phytographie) ausgebildet, die sich auch ohne Einblick in das Wesen der Methodik anwenden läßt. Insbesondere trifft dies bei der Systematik der jüngeren Sippen, der Gattungen und Arten zu. So kommt es, daß sehr häufig in sonst vorzüglich gearbeiteten Landesfloren oder Lehrbüchern eine Anordnung der größeren Gruppen des Systems verwendet wird, die einfach irgendeinem Handbuch entnommen ist, ohne daß der Autor aber auch nur im entferntesten damit ein Urteil über die wissenschaftliche Berechtigung dieser Anordnung abgeben will. Nur so ist es zu verstehen, daß beispielsweise heute nach Floren sich des De Candolleschen Systems bedienen. Man beachte aber wohl die hemmende Wirkung, welche eine solche Landesflora auf die Entwickelung der wissenschaftlichen Systematik ausüben kann; derjenige, der auf Grund derselben seine Pflanzenkenntnis erwirbt, erlangt zugleich eine Vorstellung vom System, die lange nachwirkt und von der er sich nur schwer emanzipiert.

Ueberhaupt liegt in der Macht der Tradition ein starkes Hemmnis für den Fortschritt der Systematik. Wie lange hat es gebraucht, bis sich die Botanik von dem Linnéschen Sexualsysteme frei machte? Die schematische Uebersicht auf S. 1009 zeigt, daß die Einschaltung der Monokotylen am Beginne der Angiospermen auf Jussieu zurückgeht, der dabei sich von einem bestimmten Gesichtspunkte leiten ließ, da er in der Reihenfolge Acotyledones, Monocotyledones, Dicotyledones den Ausdruck einer bestimmten Aufwärtsentwickelung sah. Nur auf die Tradition ist es zurückzuführen, wenn bis in die jüngste Zeit die Monokotyledonen am Beginne des Angiospermensystems belassen wurden und damit der klare phylogenetische Anschluß der Dikotyledonen an die Gymnospermen nicht zum systematischen Ausdrucke kam.

Eine dritte und vielleicht die gefährlichste Schwierigkeit für den wissenschaftlichen Fortschritt ergibt sich aus dem so häufigen und gerade bei wissenschaftlich geschulten Systematikern so häufigen Streben, das System nach bestimmten Prinzipien auszugestalten. Mögen auch diese Prinzipien aus phylogenetischen Anschauungen entspringen, so muß doch deren allgemeine Anwendung zu künstlichen Gruppierungen führen. Die Natur hat sozusagen nicht nach einem Schema gearbeitet. Gerade die verschiedene Gestaltung in verschiedenen Entwickelungsreihen ist darauf zurückzuführen, daß in jeder ein anderes Moment die Hauptrolle spielte. Aufgabe der natürlichen Systematik muß sein, für jede Reihe dieses Moment ausfindig zu machen; ein für eine Reihe erkanntes Prinzip läßt sich durchaus nicht auf eine andere anwenden.

Literatur. *Man vergleiche die schon im Texte angeführte Literatur und überdies insbesondere:* **J. Sachs,** *Geschichte der Botanik, 1875.* — **A. Eichler,** *Blütendiagramme, 1875 und 1878.* — **O. Drude,** *Die systematische und geographische Anordnung der Phanerogamen. In A. Schenk, Handb. d. Bot., III. Bd., 1887.* — **A. Engler und C. Prantl,** *Die natürlichen Pflanzenfamilien, 1887 bis 1909.* — **R. v. Wettstein,** *Handbuch der systematischen Botanik, 2. Aufl. 1911.* — **G. Bonnier et Leclerc du Sablon,** *Cours de Botanique, 1905.* — **J. P. Lotsy,** *Vorträge über botanische Stammesgeschichte, 1907 bis 1911.* — *Kurze Darstellungen des Systems finden sich in vielen allgemein botanischen Lehrbüchern, so z. B. in* **E. Strassburger, L. Jost, H. Schenck und G. Karsten,** *Lehrbuch der Botanik, 11. Aufl. 1911.* — **J. Wiesner und C. Fritsch,** *Organographie und Systematik, 3. Aufl. 1909.* — **F. Pax,** *Prantls Lehrbuch der Botanik, 13. Aufl. 1909 u. a.*

R. v. Wettstein.

System der Tiere.

Vgl. den Artikel „Zoologie".

Systematik und Nomenklatur der chemischen Stoffe.

I. Allgemeines. II. Systematik der anorganischen Verbindungen. III. Nomenklatur der anorganischen Verbindungen. IV. Systematik der organischen Verbindungen. V. Nomenklatur der organischen Verbindungen.

I. Allgemeines.

Eine Systematik der chemischen Stoffe hat ganz naturgemäß von der Zusammensetzung derselben auszugehen. Es läßt sich demzufolge etwa folgendes Grundschema für die Einordnung der chemischen Stoffe aufstellen:

Einfache (Grund-)Stoffe oder Elemente und
Zusammengesetzte (d. h. mehrere Elemente enthaltende) Stoffe.
Von diesen sind zu unterscheiden:
heterogene oder verschiedenteilige und
homogene oder gleichteilige Stoffe.
Von den homogenen gibt es weiter:
einheitliche (oder reine) Stoffe oder Verbindungen und
homogene Mischungen oder Lösungen.

Die Gesichtspunkte für die Systematik der Grundstoffe sind in dem Artikel „Chemische Elemente" (Abschnitt 6) dargelegt. Die heterogenen Stoffe sind bei näherer Betrachtung von einer Systematik auszuscheiden, da es zu den allerersten Aufgaben des Chemikers gehört, die heterogenen Objekte in gleichteilige zu zerlegen. (Sie haben eigentlich nur für den Mineralogen und Geologen Interesse.) Die heterogenen Stoffe wären sonach in eine Systematik der chemischen Stoffe nur als Gruppe von Objekten aufzunehmen, deren chemische Natur noch näher aufzuklären ist. — Es verbleiben daher für eine Systematik der bereits näher erforschten zusammengesetzten Stoffe die eigentlichen chemischen Verbindungen und die Lösungen (oder gleichteiligen Mischungen). Von diesen beiden Gruppen sind wieder die Verbindungen in viel größerer Zahl näher untersucht, da die Forschung sich erst in neuerer Zeit dem systematischen Studium der gleichteiligen Mischungen zugewendet hat. Eine Systematik dieser Stoffsysteme wäre durchaus verfrüht; was darüber bekannt ist, findet sich in den Artikeln „Lösungen" und „Disperse Systeme".

Somit bleibt für diesen Artikel nur die Systematik der zusammengesetzten und einheitlichen Stoffe oder Verbindungen. Als Einteilungsprinzip für die chemischen Verbindungen bietet sich ganz naturgemäß die freilich nur auf Zweckmäßigkeitsgründen (vgl. den Artikel „Anorganische Chemie") beruhende Gruppierung in anorganische und organische Verbindungen dar, die jeder speziellen Behandlung chemischer Stoffe zugrunde gelegt wird.

II. Systematik der anorganischen Verbindungen.

Für die Systematik der anorganischen Verbindungen ist der Umstand maßgebend, daß die weitaus überwiegende Mehrzahl dieser Stoffe in wässeriger Lösung Elektrolyte (Salze im weiteren Sinne) sind. Von den Stoffen, die sich in dieser Beziehung anders verhalten, wird weiter unten die Rede sein.

Die weitere Einteilung ergibt sich daraus, daß die Stoffe, welche (beim Lösen in Wasser) Wasserstoff- und Hydroxylionen bilden können, als Säuren bezw. Basen in besondere Gruppen unterzubringen sind, denen die der anderen Elektrolyte (oder Salze im engeren Sinne) an die Seite zu stellen sind. Innerhalb dieser Gruppen ist zwischen atomistischen und Molekularverbindungen zu unterscheiden.

Die Säuren sind weiter nach der Basizität, in zweiter Linie nach der Stellung des Elements, nach welchem das Anion benannt wird, im periodischen System (und zwar von kleineren zu größeren Atomgewichten fortschreitend und mit der die Halogene enthaltenden Vertikalreihe beginnend), in dritter Linie nach dem Sauerstoffgehalt zu ordnen. — Bei den kondensierten und polymolekularen Säuren (die den Molekularverbindungen zuzuzählen sind) kommt noch die Anzahl der in der Formel der Säure enthaltenen Atome des Elements, nach welchem die Säure benannt ist, in Betracht.

Die sogenannten sauren, besser Hydro-Salze wären als Stoffe, die bei der Dissoziation Wasserstoffion geben, bei den Säuren unterzubringen.

Die Gruppierung der Basen erfolgt nach den gleichen Gesichtspunkten, wobei nur an die Stelle der Basizität die Azidität zu setzen ist. Bei der weiteren Anordnung nach dem periodischen System ist mit der Vertikalreihe, in der die Alkalimetalle stehen, zu beginnen.

Bei den Salzen ist die Gruppierung in erster Linie nach der Wertigkeit der Ionen zu treffen und zwar so, daß die Wertigkeit des Kations in den Vordergrund gestellt wird. Die Anordnung gleichwertiger Kationen bezw. Anionen erfolgt nach der Stellung des Elements im periodischen System. Bei zusammengesetzten Ionen ist die Stellung desjenigen Elements maßgebend, nach

welchem das Ion benannt ist (wie bei Sulfation) oder desjenigen Elements, das gewissermaßen den Kern des zusammengesetzten Ions bildet (wie der Stickstoff im Ammoniumion). — Bei den zur Gruppe der Molekularverbindungen gehörigen Salzen ist zwischen Doppelsalzen und komplexen Salzen zu unterscheiden.

Bei den Doppelsalzen richtet sich die Anordnung nach dem durch das Produkt der Wertigkeiten der Kationen gegebenen Typus. Weiter kommen für die Gruppierung die Wertigkeit der verschiedenen Kationen und die Stellung dieser Elemente im periodischen System in Betracht, sowie die Wertigkeit des Anions und die Stellung des Elements, nach welchem das Anion benannt ist.

Bei den komplexen Salzen sind die beiden Grundtypen zu unterscheiden, daß das komplexe Ion Kation bezw. Anion ist. Für die Gruppierung der komplexen Kationen wird der Typus durch die Wertigkeit des entsprechenden einfachen Kations und durch die Eigenschaften des Elements im Komplex bestimmt, durch dessen Nebenvalenzen (nach den bestehenden Vorstellungen) die Verkettung des Neutralteils mit dem Zentralatom zustande kommt. Bei den Salzen mit komplexen Anionen ist der durch die Zusammensetzung des Anions und durch die Eigenschaften der Komponenten gegebene Typus maßgebend. Die Wertigkeit des einfachen (d. h. nicht zum Komplex gehörigen) Kations kommt nur in untergeordnetem Maße zur Geltung (wie bei den einfachen Salzen die Wertigkeit des Anions).

Den Elektrolyten sind die anorganischen Nichtelektrolyte oder indifferenten Verbindungen gegenüberzustellen. In diese Kategorie gehören die Hydride, Boride, Karbide, Silicide, Nitride, Phosphide, Arsenide, Antimonide, Sulfide (wie CS_2), Selenide, Telluride, Halide (wie JCl) und zahlreiche Legierungen (z. B. Merkuride), also Verbindungen von den in den mittleren Vertikalreihen des periodischen Systems stehenden Elementen, von denen die Mehrzahl amphoteren Charakter hat, mit Metallen bezw. Nichtmetallen und Verbindungen unter den Gliedern einer der äußeren oder zweier benachbarter Vertikalreihen des periodischen Systems. — Die systematische Gruppierung dieser Stoffe dürfte am besten so zu treffen sein, daß sie in erster Linie nach dem metallischen (d. h. positiveren) Bestandteil, und zwar nach dessen Wertigkeit und Stellung im periodischen System erfolgt, in zweiter Linie nach den entsprechenden Eigenschaften des nichtmetallischen Bestandteils. Welchem Element der metallische bezw. nichtmetallische Charakter zukommt, läßt sich nach dem Verhalten zu Wasser beurteilen (vgl. R. Abegg, Zeitschr. f. anorg. Chemie 39, 388, 1904). Derjenige, welcher bei der Wechselwirkung mit Wasser das Hydroxyd (oder mit Salzsäure das Chlorid) gibt, ist der metallische Bestandteil, während der, dessen Wasserstoffverbindung dabei entsteht, als der nichtmetallische anzusehen ist.

Ueber die Systematik A. Werners s. die Artikel „Chemische Verbindungen" und „Valenzlehre".

III. Nomenklatur der anorganischen Verbindungen.

Die Bezeichnung anorganischer Verbindungen ist keine durchaus einheitliche. Die gebräuchlichsten Benennungen der einfachen Salze sind in dem Artikel „Salze" unter 4. erwähnt und für die Komplexsalze unter „Salze" 17d. — Im folgenden sollen noch einige Momente Erwähnung finden, die dazu beitragen, die Zusammensetzung der Stoffe durch die Benennung möglichst eindeutig anzugeben und damit die Durchführung der im vorstehenden dargelegten Systematik zu erleichtern.

Bei Metallen, die verschiedenwertig auftreten können, wird die Wertigkeitsstufe (statt auf die Bd. VIII S. 531 angegebene Weise) durch eine dem Metall angefügte, die Wertigkeitsstufe angebende römische Zahl bezeichnet: Eisen(II)chlorid, Eisen(III)-chlorid usw. — Die Anwendung dieser Bezeichnung verbietet sich nur dann, wenn die Zusammensetzung der fraglichen Stoffe nicht genau bekannt ist.

Wenn die Zusammensetzung eines Stoffs direkt durch die Benennung unter Verwendung von Ziffern angegeben werden soll, empfiehlt es sich, um Verwechslungen mit Wertigkeitsangaben vorzubeugen, arabische Ziffern zu benutzen und sie dem Element bezw. Radikal voranzustellen, also z. B. zu sagen: 2Eisen-3sulfat.

Unklarheiten können weiter bei den Anionen kondensierter Säuren auftreten, wie bei Polyboraten, Polysilikaten u. a. Es bietet sich da die Möglichkeit, die Zusammensetzung durch (arabische) Ziffern anzugeben, die sich auf die charakteristischen Atome beziehen, so bei Bichromaten durch Voranstellen einer 2, bei Tetraboraten durch Voranstellen einer 4. Da indessen die Durchführung dieser Bezeichnungsweise auf Schwierigkeiten stößt (vgl. Zeitschr. f. anorg. Chemie Generalregister S. XII), ist es zweckmäßiger, in diesen Fällen bei den eingebürgerten Benennungen zu bleiben und die Ionenwertigkeit des Anions durch eine dem Kation vorangestellte Zahl anzugeben und beispielsweise zu sagen: 2-Natrium-tetraborat.

Für die Bezeichnung von Stoffen, die mehr als zwei Bestandteile enthalten, sind

noch folgende Momente zu beachten. — Sogenannte saure bezw. basische Salze werden als Hydro- bezw. Hydroxy- oder Oxysalze bezeichnet. Dabei wird der Name des anderen Kations dem „Hydro“ vorangestellt und das „Oxy“ resp. „Hydroxy“ dem des Anions. Wenn nötig (wie bei NaH_2PO_4 wird die Zusammensetzung durch vorangestellte Ziffern noch näher bezeichnet, also beispielsweise gesagt: Natrium-2hydrophosphat. — Bei den sauerstoffhaltigen Kationen, für welche sich besondere Benennungen eingebürgert haben, werden diese benutzt, wie Wismutyl für $BiO^{\cdot}$, Antimonyl für $SbO^{\cdot}$, Uranyl für $UO_2^{\prime\prime}$.

Im übrigen kommt es bei der Benennung komplizierterer Stoffe darauf an, daß man ersieht, ob es sich um ein Doppel- resp. Komplexsalz handelt und in welche Ionen der Stoff in erster Linie zerfällt. Zu dem Zweck trennt man Kation und Anion durch einen längeren, gleichartige Ionen durch einen kürzeren Bindestrich. So bedeutet: „Kalium-Aluminium—sulfat“, daß dieses Salz die Ionen $K^{\cdot}$, $Al^{\cdot\cdot\cdot}$, $2SO_4^{\prime\prime}$ bildet, daß es also Doppelsalzcharakter hat. Und aus der Bezeichnung „Kalium—Chrom, 2 oxalat“ geht hervor, daß es sich um ein komplexes Salz mit den Ionen $K^{\cdot}$ und $Cr(C_2O_4)_2^{\prime}$ handelt. Wenn nötig, wird die Wertigkeit des im Komplex enthaltenen metallischen Bestandteils durch eine beigefügte römische Ziffer bezeichnet (so im obigen Falle durch „—Chrom (III), 2oxalat“. Sie ergibt sich zwar vielfach von selbst, so, wenn die Anzahl der dazu gehörigen Kationen und damit die Ionenwertigkeit des Anions bekannt ist. Doch gibt es auch Fälle, in denen die ausdrückliche Angabe der Wertigkeit des metallischen Bestandteils im Anion zur Notwendigkeit wird, nämlich immer, wenn es analoge Salze eines Metalles gibt. die verschiedenen Wertigkeitsstufen angehören, wie Kalium—Eisen (II), cyanid und Kalium—Eisen (III), cyanid. Dasselbe ergibt sich zwar auch aus der Benennung nach der Zusammensetzung, nämlich 4Kalium—Eisencyanid resp. 3 Kalium—Eisencyanid. Da es sich aber in diesem Falle um die Hervorhebung des Unterschieds in der Wertigkeit des Eisens handelt, erscheint es zweckmäßiger, dies direkt zum Ausdruck zu bringen.

Bei den Komplexsalzen, die durch Aufnahme eines Neutralteils (wie Ammoniak) entstehen, wird der Name des Neutralteils dem des anderen Bestandteils des Komplexes nachgestellt, wenn es ein Kation ist und vorangestellt, wenn der Komplex Anionencharakter hat. Die Dissoziationsstelle wird durch einen längeren Bindestrich angedeutet. So sind die Benennungen für die Verbindungen $Cu(NH_3)_4SO_4$: Kupfer, 4 Ammoniak—sulfat, $Ag_3J_2NO_3$: Silber, 2 Silberjodid—nitrat, $2(NH_4)_3(PO_4)_2 \cdot 5MoO_3, 7H_2O$: 6 Ammonium—5 Molybdäntrioxyd, 2 Phosphat.

In analoger Weise erfolgt die Bezeichnung der komplexen Säuren, die sich durch Ersatz des Sauerstoffs der Platinsäure ableiten: 2 Hydro—Platin, 6 Chlorid für H_2PtCl_6, 2 Hydro—Platin, 5 Hydroxy, Chlorid für $H_2Pt(OH)_5Cl$ usf.

Literatur. *Wegen der Bezeichnung von Verbindungen noch komplizierterer Zusammensetzung sei auf die Abhandlung von* **A. Werner** *(Zeitschrift f. anorg. Chemie* **14**, *21 usf.) verwiesen. Weiteres zur Systematik und Nomenklatur anorganischer Verbindungen findet sich in dem Artikel „Chemische Typen“ und in der Abhandlung: Ein Verfahren zur Registrierung anorganischer Stoffe von* **A. Rosenheim und J. Koppel.** *Generalregister der Bände 1—50 der Zeitschr. f. anorg. Chemie.*

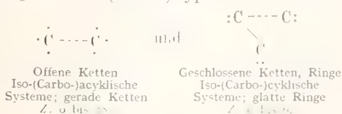
W. Böttger.

IV. Systematik der organischen Verbindungen.

Die außerordentliche Reichhaltigkeit und Mannigfaltigkeit der Verbindungsklasse, die wir unter dem Namen „organische Verbindungen“ zusammenfassen, beruht in erster Linie auf der beim Kohlenstoff vorhandenen und für dieses Element besonders charakteristischen, weitgehenden Fähigkeit zur kettenförmigen (acyklischen) und zur ringförmigen (cyklischen) Verknüpfung der Atome (vgl. den Artikel „Organische Chemie“). Dadurch, daß auch ein oder mehrere Atome fremder Elemente sich an dem Bau der Kette oder des Ringes beteiligen können, wird die Mannigfaltigkeit noch erheblich gesteigert.

Die folgenden Ausführungen sollen eine Uebersicht über die Hauptgruppen der organischen Verbindungen geben und die Orientierung in den organisch-chemischen Teilen des Handwörterbuchs erleichtern. Die Bindungen zwischen den eigentlichen Ketten- und Ringgliedern sind durch —, die freien Valenzen durch · gekennzeichnet.

Wenn nur C-Atome an der Bildung der eigentlichen Ketten- und Ringgebilde teilnehmen (fremde Atome, die nicht auf beiden Seiten direkt oder durch Vermittelung eines anderen fremden Atoms an Kohlenstoff gebunden sind, wollen wir als Substituentenglieder betrachten), so bekommen wir als Grundformen der Ketten und der Ringe die Iso-(Carbo-)Typen

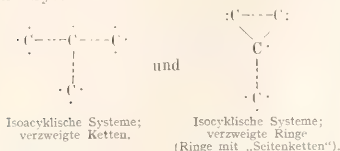


Offene Ketten Iso-(Carbo-)acyklische Systeme; gerade Ketten [illegible]

Geschlossene Ketten, Ringe Iso-(Carbo-)cyklische Systeme; glatte Ringe [illegible]

Die Strichelung soll bedeuten, daß an dieser Stelle eine gewisse (hier unter „Z“ angegebene) Anzahl von C-Atomen als Zwischenglieder von der Form —C— eintreten kann.

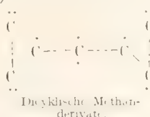
Von den „geraden Ketten“ und von den „glatten Ringen“ leiten sich die „verzweigten“ Systeme ab:



Isoacyklische Systeme; verzweigte Ketten. — und — Isocyklische Systeme; verzweigte Ringe (Ringe mit „Seitenketten“).

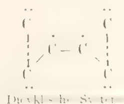
Der „Zweig“, die „Seitenkette“ des Ringes, kann selbst wieder Ringbildung aufweisen:

1. indem der zweite Ring mittelbar (durch Bindeglieder) mit dem ersten verbunden ist:



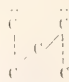
Dicyklische Methanderivate.

2. indem der zweite Ring unmittelbar (ohne Bindeglied) mit dem ersten verbunden ist:



Dicyklische Systeme.

3. indem der zweite Ring ein Glied mit dem ersten gemeinsam hat:



Doppelringe mit quartärem C-Atom.

4. indem der zweite Ring zwei benachbarte Glieder mit dem ersten gemeinsam hat:



Kondensierte Systeme.

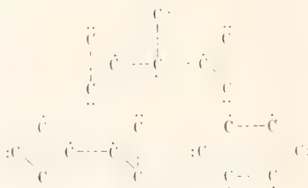
5. indem der zweite Ring drei oder mehr Glieder, eine „Brücke“, mit dem ersten gemeinsam hat:



Brückensysteme.

Auch bei allen diesen Systemen können „Zweige“ auftreten; Ringbildung in diesen Seitenketten führt zu Systemen aus drei und mehr Ringen, deren wichtigste folgenden Typen entsprechen:





Iso-(Carbo-)Systeme

I. Ketten [24]

(Offene Ketten, acyklische Systeme; aliphatische Verbindungen, Fettkörper Methanderivate [4])

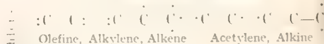
Iso-(Carbo-)acyklische Systeme

Gerade Ketten

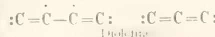
Gesättigte Systeme



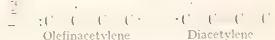
Ungesättigte Systeme



Olefine, Alkylene, Alkene — Acetylene, Alkine

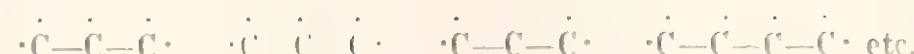


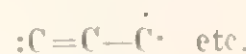
Diolefine



Olefinacetylene — Diacetylene

Verzweigte Ketten



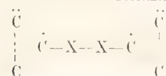




Werden nun in den verschiedenen Typen ein oder mehrere C-Atome durch Atome fremder Elemente (X, Y) ersetzt, so erhalten wir neue Grundformen, z. B.



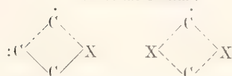
Heteroacyklische Systeme.



Polycyklische Heterosysteme.



Heterocyklische Systeme.



Heterocyklische kondensierte Systeme.

Ueber die Substitutionsprodukte mit Se, Te, P, As, Sb, Si und Metallen siehe [26].

Als fremde (Hetero-)Elemente kommen hauptsächlich in Betracht O, S, N; ferner Se, Te, P, As, Sb, B, Si; schließlich die mehrwertigen Metalle, wenn sie nicht als Kationen fungieren.

Die Reichhaltigkeit der Gruppen wird ferner dadurch erheblich vermehrt, daß in allen Systemen eine oder mehrere doppelte Bindungen von der Form :C = C:, :C = X und X = X, in den Ketten ferner auch eine oder mehrere dreifache Bindungen von der Form ·C ≡ C· (und auch doppelte und dreifache Bindungen nebeneinander) auftreten können.

Die Kette ·C—X—C· läßt sich natürlich auch z. B. als Substitutionsprodukt der Wasserstoffverbindung X<H H interpretieren, ohne daß X als eigentliches Kettenglied angesehen, der Begriff der Kette vielmehr nur auf die den H ersetzenden „Alkyle" („Alphyle", d. h. Reste aliphatischer Kohlenwasserstoffe, oder „Aryle" d. h. Reste aromatischer Kohlenwasserstoffe) angewendet wird; für unsere Darlegungen ist die oben gegebene Darstellungsweise wegen der Beziehungen zwischen heteroacyklischen und heterocyklischen Systemen u. a. zweckmäßiger.

Die nachstehenden Tabellen enthalten nur wichtige Grundtypen, daneben einzelne weniger bemerkenswerte Systeme, die beigefügt wurden, um die Reichhaltigkeit der organischen Körperklassen darzutun. Unter den einzelnen Formeln stehen die Benennungen der betreffenden einfachen Muttersysteme oder die (eingeklammerten) Namen von Derivaten. Die ersten Tabellen enthalten auf der linken und auf der rechten Seite gegenübergestellt korrespondierende Iso-(Carbo-) und Hetero-Systeme. Aus Raumgründen mußten die cyklischen Systeme mit mehreren Heteroatomen im nämlichen Ring in einer besonderen Tabelle zusammengestellt werden. In den Ringsystemen sind die C-Atome weggelassen; auf S. 1000 ist ihre Stellung durch die Valenzpunkte angegeben, die später ebenfalls meist fortfallen. Ueber die Mannigfaltigkeit der Doppelbindungen orientieren die Tabellen auf S. 1000 und 1001; natürlich konnten bei den meisten übrigen Symbolen nicht alle Möglichkeiten angeführt werden; es wurde deshalb gewöhnlich das Schema ohne Doppelbindungen gesetzt. Die in Klammern stehenden Ziffern verweisen auf die einschlägigen Spezialartikel des Handwörterbuchs, entsprechend der untenstehenden Uebersicht.

Durch den Eintritt von Substituenten (vgl. den Artikel „**Substitution**") an den freien Valenzen des Kohlenstoffs entstehen zahlreiche Derivatenklassen, über welche die Zusammenstellung auf S. 1004, in der die substituierenden Atome fettgedruckt sind, eine Uebersicht gibt.

Hetero-Systeme

I. Ketten [24]

(Offene Ketten, acyklische Systeme; aliphatische Verbindungen, Fettkörper, Methanderivate)

Heteroacyklische Systeme

Gerade Ketten

Gesättigte Systeme

·C—X—C·
X = O: Aether [1], Ester [17], Säureanhydride [35]
S: Thioäther [36]
NH: Sek. Amine [7] usw.

·C—X—X—C·
X = X = O = O: Peroxyde [35]
NH = NH: Dialkylhydrazine [7]

·C—X—C—X—C·
X,X = NH,NH: Dialkylharnstoffe [25]

Ungesättigte Systeme

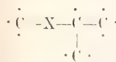
·C = X = C:
X = N: Alkylierte Iminbasen (Aldimide [illegible])

·C—X = X—C·
X = X = N = N: Azoverbindungen.
Mit N = N[illegible] statt N [illegible]

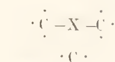
·C—X—Y—C·
X = O, Y = SO₂: Alkylsulfosäurealkylester [17, 26]

·C—X—Y—X—C·
X, X = O, O, Y = SO: Schwefligsäuredialkylester [illegible]

Verzweigte Ketten



X = O: Aether [1], Ester [17]
NH: Sek. Amine [7]



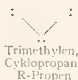
X = N: Tert. Amine [7]

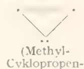
Iso-(Carbo-)Systeme
II. Ringe [24]
(Geschlossene Ketten, cyklische Systeme)
Iso-(Carbo-)cyklische Systeme [22]

1a) Monocyklische (einkernige) Verbindungen

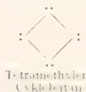
Glatte Ringe

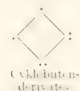
Tricyklische Systeme

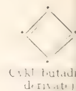

Trimethylen, Cyklopropan R-Propen


(Methyl-Cyklopropenderivate)

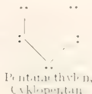
Tetracyklische Systeme

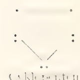

Tetramethylen, Cyklobutan

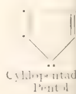

Cyklobutenderivate


Cyklobutadiënderivate

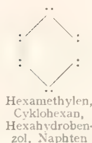
Pentacyklische Systeme


Pentamethylen, Cyklopentan

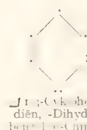

Cyklopenten

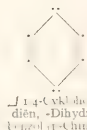

Cyklopentadiën, Pentol

Hexacyklische Systeme


Hexamethylen, Cyklohexan, Hexahydrobenzol, Naphten


Cyklchexen, Tetrahydrobenzol


Δ 1,3-Cyklohexadiën, -Dihydrobenzol [illegible]


Δ 1,4-Cyklohexadiën, -Dihydrobenzol (p-Chinen)


Cyklohexatriën Benzol

Einkernige hydroaromatische Verbindungen, Hydrobenzolgruppe [22, [illegible]]

Einkernige aromatische Verbindungen, Benzolgruppe [10, 13]

Heptacyklische Systeme

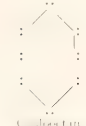

Heptamethylen, Cykloheptan, Suberan

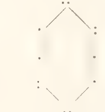

Cyklohepten, Suberen


Cykloheptadiën


Cykloheptatriën

Octocyklische Systeme


Cyklooctan

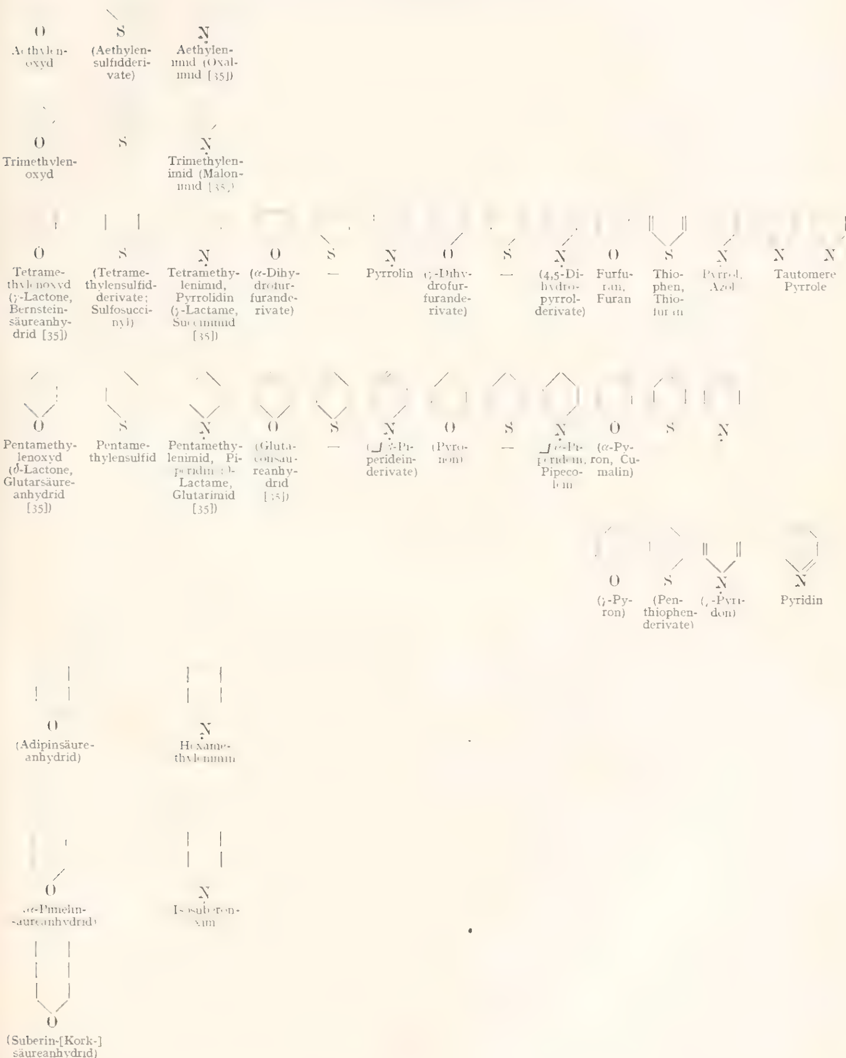

Δ 1,5-Cyklooctadiën


Cyklooctatetr[illegible]

Nonacyklische Systeme

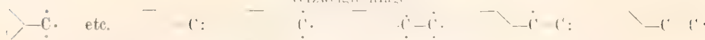

Cyklononan

Hetero-Systeme
II. Ringe [24]
(Geschlossene Ketten, cyklische Systeme)
Heterocyklische Systeme [19]
mit einem Hetero-Atom im einzelnen Ring
1b) Monocyklische (einkernige) Verbindungen
Glatte Ringe



Iso-(Carbo-)Systeme

Verzweigte Ringe



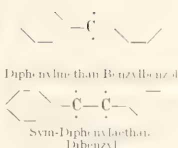
Methyltrimethylen [22] | (Fulvenderivate) | Methylbenzol, Toluol [38] | Aethylbenzol [38] | Phenylaethylen, Styrol [38] (Olefinbenzole) | Phenylacetylen (Acetylenbenzole) [38]

2a) Polycyklische (mehrkernige) aromatische Systeme

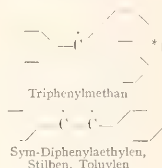
Polyphenylverbindungen [33]

Polyphenylparaffine etc.

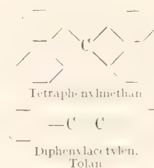
Mit Bindeglied [33].



Diphenylmethan, Benzylbenzol



Triphenylmethan



Tetraphenylmethan

—C—C—

Sym-Diphenylaethan, Dibenzyl

C—C

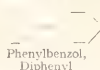
Sym-Diphenylaethylen, Stilben, Toluylen

—C C

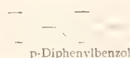
Diphenylacetylen, Tolan

Phenylbenzolgruppe, Polyaryle

Ohne Bindeglied [33]



Phenylbenzol, Diphenyl



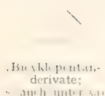
p-Diphenylbenzol

Mit einem gemeinschaftlichen C-Atom

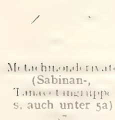


Spirane.

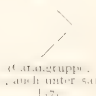
3a) Kondensierte Iso-Systeme [39]



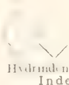
(Bicyklopentanderivate; s. auch unter 5a)



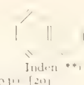
Metachinonderivate (Sabinan-, Tanacetingruppe s. auch unter 5a) [37]



(Carangruppe, s. auch unter 5a) [37]

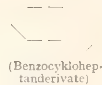


Hydrinden

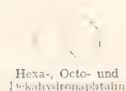


Inden **)

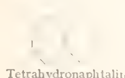
Indengruppe [20]



(Benzocykloheptanderivate)



Hexa-, Octo- und Dekahydronaphtalin

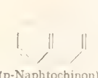


Tetrahydronaphtalin

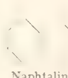
Hydronaphtalingruppe [22, 27]



(o-Naphtochinon)



(p-Naphtochinon)

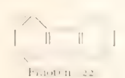


Naphtalin

Naphtalingruppe [27]



Diphenylen



Fluoren [22]



(Naphtindenderivate)



Acenaphten



(Indacenderivate)



(Poly-Hydroanthracene)



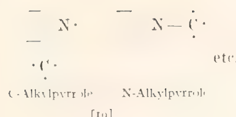
Anthracen

Anthracengruppe [7, 18]

*) Ueber Verbindungen mit d r e i wertigem C-Atom (Triphenylmethylgruppe) siehe [33].
**) Ueber tautomere Formen s. Pyrrol.

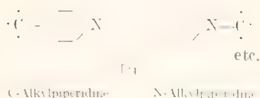
Hetero-Systeme

Verzweigte Ringe.



C-Alkylpyrrole N-Alkylpyrrol

[19]



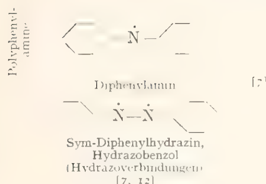
C-Alkylpiperidine N-Alkylpiperidine

2b) Polycyklische (mehrkernige) Hetero-Systeme

α) mit Hetero-Atomen im Bindeglied
β) mit einem Hetero-Atom im einzelnen Ring.

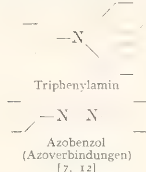
Mit Bindeglied.

Polyphenylamine



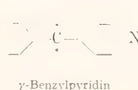
Diphenylamin [7]

Sym-Diphenylhydrazin, Hydrazobenzol (Hydrazoverbindungen) [7, 12]



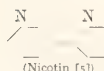
Triphenylamin

Azobenzol (Azoverbindungen) [7, 12]

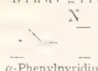


γ-Benzylpyridin

Ohne Bindeglied



(Nicotin [5])

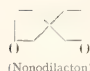


α-Phenylpyridin

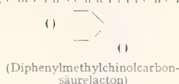


γ,γ-Dipyridyl

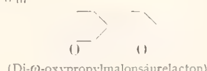
Mit einem gemeinschaftlichen C-Atom



(Nonodilacton)



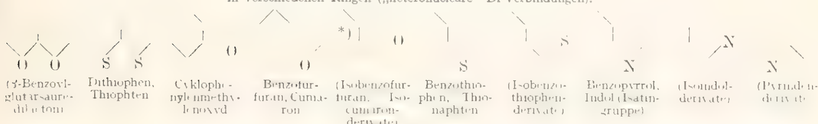
(Diphenylmethylchinolcarbonsäurelacton)



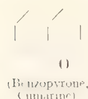
(Di-ω-oxypropylmalonsäurelacton)

3b) Kondensierte Hetero-Systeme [19, 18, 39]

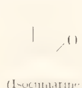
α) mit einem Hetero-Atom, β) mit zwei Hetero-Atomen in verschiedenen Ringen („heteronucleare" Di-Verbindungen).



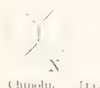
(β-Benzoylglutarsäuredilacton) — Dithiophen, Thiophten — Cyklophenylenmethylenoxyd — Benzofurfuran, Cumaron — (Isobenzofurfuran, Isocumaronderivate) — Benzothiophen, Thionaphten — (Isobenzothiophenderivate) — Benzopyrrol, Indol (Isatingruppe) — (Isoindolderivate) — (Pyrindenderivate)



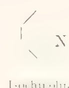
(Benzopyrone, Cumarine)



(Isocumarine)



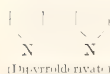
Chinolin [14]



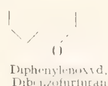
Isochinolin



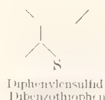
Naphthyridin



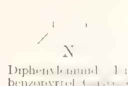
(Dipyrrolderivate)



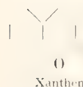
Diphenylenoxyd, Dibenzofurfuran



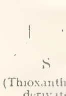
Diphenylensulfid, Dibenzothiophen



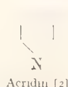
Diphenylenimid, Dibenzopyrrol (Carbazol)



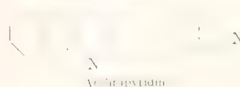
Xanthen



(Thioxanthenderivate)



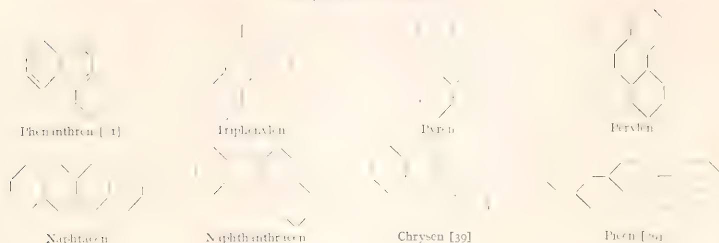
Acridin [2]



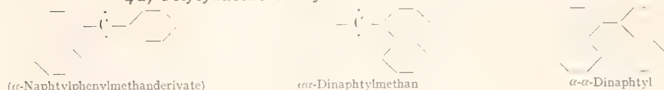
Naphthopyridin

*) — Abkürzung für den Benzolring

Iso-(Carbo-)Systeme.

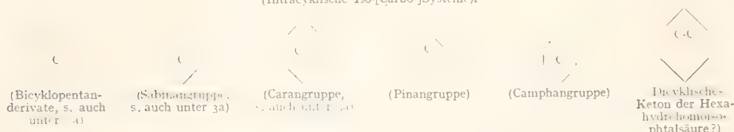


4 a) Polycyklische Iso-Systeme mit kondensierten Kernen.

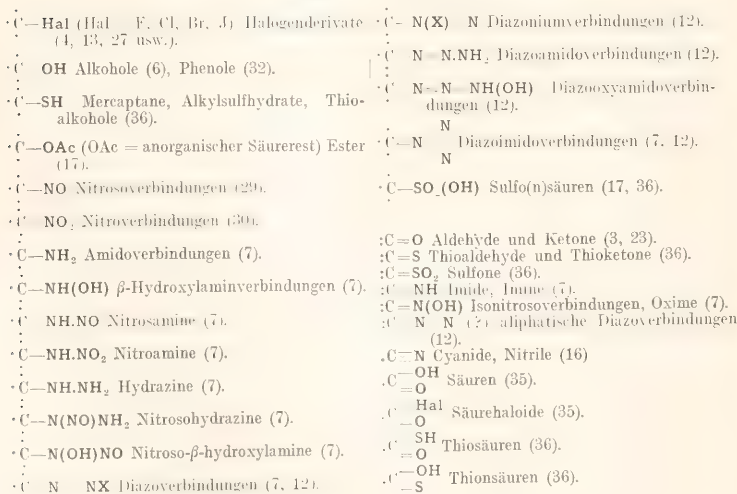


5 a) Iso-Systeme mit Brücken [37].

(Intracyklische Iso-[Carbo-]Systeme).



Substitutionsprodukte.



·C—Hal (Hal = F, Cl, Br, J) Halogenderivate (4, 13, 27 usw.).

·C—OH Alkohole (6), Phenole (32).

·C—SH Mercaptane, Alkylsulfhydrate, Thioalkohole (36).

·C—OAc (OAc = anorganischer Säurerest) Ester (17).

·C—NO Nitrosoverbindungen (29).

·C—NO_2 Nitroverbindungen (30).

·C—NH_2 Amidoverbindungen (7).

·C—NH(OH) β-Hydroxylaminverbindungen (7).

·C—NH.NO Nitrosamine (7).

·C—$NH.NO_2$ Nitroamine (7).

·C—$NH.NH_2$ Hydrazine (7).

·C—$N(NO)NH_2$ Nitrosohydrazine (7).

·C—N(OH)NO Nitroso-β-hydroxylamine (7).

·C—N=NX Diazoverbindungen (7, 12).

·C—N(X)≡N Diazoniumverbindungen (12).

·C—N=$N.NH_2$ Diazoamidoverbindungen (12).

·C—N=N—NH(OH) Diazooxyamidoverbindungen (12).

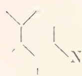
·C—N<N/N Diazoimidoverbindungen (7, 12).

·C—SO_2(OH) Sulfo(n)säuren (17, 36).

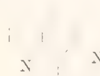
:C=O Aldehyde und Ketone (3, 23).
:C=S Thioaldehyde und Thioketone (36).
:C=SO_2 Sulfone (36).
:C=NH Imide, Imine (7).
:C=N(OH) Isonitrosoverbindungen, Oxime (7).
:C=N≡N (?) aliphatische Diazoverbindungen (12).
.C≡N Cyanide, Nitrile (16)
.C—OH / =O Säuren (35).
.C—Hal / =O Säurehaloide (35).
.C—SH / =O Thiosäuren (36).
.C—OH / =S Thionsäuren (36).

Hetero-Systeme.

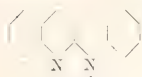

α-Naphtochinolin


β-Naphtochinolin


Phenanthridin


Phenanthrolin


[illegible]


Chindolin


Anthrachinolin


Naphtinolin

4b) Polycyklische Hetero-Systeme mit kondensierten Kernen [21, 18].

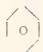

(Bisbenzofurfuran-[Dicumaron-] Derivate: Oxindigo)

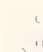

(Bisbenzothiophenderivate: Thioindigorot)


(Bisindolderivate: Indigoblau, Indigotin)

5b) Hetero-Systeme mit Brücken.

(Intracyklische Hetero-Systeme).


(Terpinencineol) [7]


(Cineol, Eucalyptol)


(Tropingruppe [5])


(Granatonin-gruppe [5])


Chinuclidin (Cinchoningruppe [5]).


$.C{-SH \atop =S}$ Bithionsäuren (36).


$.C{-NH_2 \atop =O}$ Säureamide (35).

$.C{-NH_2 \atop S}$ Thioamide (36).

$.C{-NH_2 \atop NH}$ Amidine (7).

$.C{-OH \atop =N(OH)}$ Hydroxamsäuren (7).

$.C{-NH_2 \atop -N(OH)}$ Amidoxime, Oxamidine (7).

$.C{-NO_2 \atop =N(OH)}$ Nitrolsäuren (7, 30).

$:C{-NO_2 \atop -NO}$ Nitronitrosoverbindungen, Pseudonitrole (7, 30).

$.C{NH(OH) \atop -N(OH)}$ Nitrosoxime, Nitrosolsäuren, Hydroxamoxime (7).

Verzeichnis der einschlägigen Sonderartikel.

1. Aether.
2. Akridingruppe.
3. Aldehyde.
4. Aliphatische Kohlenwasserstoffe.
5. Alkaloide.
6. Alkohole.
7. Ammoniakderivate.
8. Anhydride.
9. Anthracengruppe.
10. Aromatische Reihe.
11. Azine.
12. Azoverbindungen.
13. Benzolgruppe.
14. Chinolingruppe.
15. Chinone.
16. Cyanverbindungen.
17. Ester.
18. Farbstoffe.
19. Heterocyklische Verbindungen.
20. Indengruppe.
21. Indigogruppe.
22. Isocyklische Verbindungen.
23. Ketone.
24. Ketten- und Ringsysteme.
25. Kohlensäurederivate.
26. Organische Verbindungen der Metalle und Nichtmetalle.
27. Naphtalingruppe.
28. Naphtene.
29. Nitrosoverbindungen.
30. Nitroverbindungen.
31. Phenanthrengruppe.
32. Phenole.
33. Polyphenylverbindungen.
34. Pyridingruppe.
35. Säuren.
36. Thio- und Sulfoverbindungen.
37. Terpene.
38. Toluolgruppe.
39. Kondensierte Systeme.

Hetero-Systeme.

Monocyklische Hetero-Systeme mit zwei Hetero-Atomen im Ring [19, 11].



V. Nomenklatur der organischen Verbindungen.

1. Definition. 2. Historisches. 3. Gebräuchliche Nomenklatur.

1. **Definition.** Als Nomenklatur kann jedes nach einheitlichen Gesichtspunkten gewählte Bezeichnungssystem der organischen Verbindungen überhaupt oder größerer Körperklassen bezeichnet werden, eine rationelle Nomenklatur soll überdies die Konstitution der Verbindung möglichst vollständig durch den Namen zum Ausdruck bringen. Im Idealfalle stellt der rationelle Name somit eine gesprochene Strukturformel vor, und ist darum eindeutig für jeden Stoff bekannter Zusammensetzung zu bilden. Indem man nämlich jedem konstitutiven Merkmal und jeder chemischen Funktion eines Moleküls bestimmte Wortelemente (volle oder abgekürzte Atomnamen, Zahlworte, Vor- und Endsilben) zuordnet, wird sein Name aus diesen Elementen nach

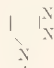
Hetero-Systeme.

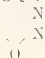
Monocyklische Hetero-Systeme mit drei Hetero-Atomen im Ring [19, 11].

Monocyklische Hetero-Systeme mit vierHetero-Atomen im Ring.

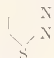
Azole [19]

Triazole, Pyrrodiazole

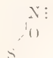




(Diazoanhydride)



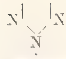
(Diazosulfide)



(Aminosulfosäureanhydride; Taurin)



Tetrazole, Pyrrotriazole



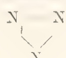
Osotriazole (Azimide)

Furazane

Furodiazole

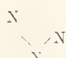
Piazthiole

Thiodiazole



Oxybiazole

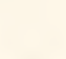
Thiobiazole

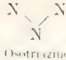


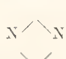
Azoxime

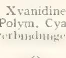
Azosulfime, (Persulfocyansäure)

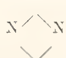
Xanthanwasserstoff

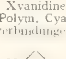


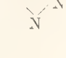


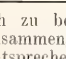


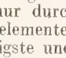


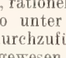


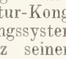


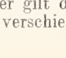


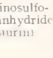




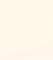


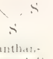












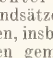


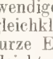


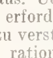


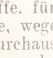


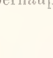












Azine [11]

Osotriazine

Azoxazine

Thiodiazine, Diazthine

(Glyoxim-N-phenyläther)

Trioxymethylen; Polym. Aldehyde

Triazine

Xyanidine (Polym. Cyanverbindungen)

Oxydiazine

(Thialdin)

Thiodiazine

Osotetrazine

Tetrazine

Trithioaldehyde

(Benzenylamidoximessigsäureanhydrid)

---

einer noch zu bestimmenden Reihenfolge ebenso zusammengesetzt, wie die Formel aus den entsprechenden Symbolen. Von den hiernach möglichen zahllosen Systemen, die sich nur durch Wahl und Anordnung der Wortelemente unterscheiden, ist das zweckmäßigste und einfachste auszuwählen.

2. Historisches. Die Bemühungen eine allgemeine, rationelle Nomenklatur in reinster Form, also unter Vermeidung von Eigennamen, durchzuführen sind bisher stets erfolglos gewesen. Für die aliphatischen Verbindungen hat der Genfer Internationale Nomenklatur-Kongreß (1892) ein solches Bezeichnungssystem ausgearbeitet, das jedoch trotz seiner Zweckmäßigkeit keine allgemeine Durchführung gefunden hat. Noch viel weniger gilt dies von den Vorschlägen, die von verschiedenen Forschern (Bouveault, Richter u. a.) im Anschluß an die Genfer Grundsätze für die Bezeichnungen der cyklischen, insbesondere der aromatischen Verbindungen gemacht worden sind. Die rationellen Namen komplizierterer Stoffe werden notwendigerweise lang, schwer verständlich, gleichklingend und lösen daher nicht wie kurze Eigennamen, die sich dem Gedächtnis leicht einprägen ein bestimmtes Formelbild aus. Ueberdies würde es Studium und Uebung erfordern, die Namen richtig zu bilden und zu verstehen. Außerdem hat sich diese streng rationelle Nomenklatur gerade zur Registrierung und Systematik der organischen Stoffe, für die man soviel von ihr erhofft hatte, wegen ihrer zu großen Allgemeinheit durchaus unbrauchbar erwiesen. Während man deshalb zu Registrierungszwecken überhaupt auf die Bruttoformel

Hetero-Systeme.

Polycyklische Hetero-Systeme mit mehreren Hetero-Atomen im Ring

(Dihydrazimethylenderivate) | Glycosin

Kondensierte Hetero-Systeme mit zwei Hetero-Atomen im Ring („isonucleare" Di-Verbindungen) [19, 18]

Chinazolinone

Brenzcatechinmethylenäther | (Cykl. Mercaptale) | Benzoxyglyoxaline, Benzimidazole | Indazol | Anthranil | Indoxazene, Benzisoxazole | Benzoxazole | Benzthiazole | (Pyrazolonopyrazolon)

Brenzcatechinäthylenäther | Chinoxaline | Chinazoline, Phenmiazine | Cinnoline | Phthalazine | Benzoparoxazine | (Carbonylsalicylamid) | (Isatosäureanhydrid) | Benzometathiazine, Phenpenthiazole | Purin (Harnsäure etc.)

Thianthren | Phenazin | Phenoxthin | Dibenzoparoxazine, Phenoxazine | Dibenzoparathiazine, Thiodiphenylamine

Phenazone | Perimidin

zurückgegangen ist, hat man für die Textnomenklatur mindestens eine Anzahl von Eigennamen beibehalten müssen, um den oben geschilderten Schwierigkeiten auszuweichen.

3. Gebräuchliche Nomenklatur. Die organischen Verbindungen können bekanntlich als Derivate einer relativ geringen Zahl von Stammsubstanzen angesehen werden. Behält man für diese Grundkörper die gebräuchlichen oder neugebildete Eigennamen bei und bezeichnet die substituierenden Gruppen, welche die chemischen Funktionen des Moleküls charakterisieren, durch allgemein gültige Namen oder Silben, so kann unter Einhaltung einiger Regeln jeder Körper als Derivat einer jener Stammsubstanzen bezeichnet werden (Prinzip der Substitution). Die Verbindungen erscheinen dann schon durch ihre Bezeichnung in doppelter Weise, nämlich als Derivate derselben Substanz und als Träger gleicher Funktionen, geordnet, was auch für ihre Systematik wertvoll ist.

Eine Schwierigkeit bietet nur die Wahl der Stammsubstanz, da im allgemeinen jeder Körper als Derivat verschiedener Grundstoffe betrachtet werden kann. Gewöhnlich wählt man in der aliphatischen Reihe den höchsten im Molekül enthaltenen Kohlenwasserstoff, den man nach den Genfer Beschlüssen bezeichnet, als Grundsubstanz, die einfacheren aromatischen und heterocyklischen Verbindungen werden gewöhnlich auf das wasserstoffärmste Ringsystem, das ihnen zugrunde liegt, bezogen, kompliziertere aus mehreren Ringsystemen oder aus Ketten und Ringsystemen aufgebaute Stoffe werden gegenwärtig noch sehr willkürlich bald auf cyklische, bald auf offene Stammsubstanzen bezogen, wenn sie nicht überhaupt mit neuen Eigennamen belegt werden.

Eine Zusammenstellung aller bisher als Stammsubstanzen benutzten Ringsysteme, samt zugehöriger Bezifferung findet man im ersten Bande von M. M. Richters Lexikon der Kohlenstoffverbindungen, von ihrer Wiedergabe kann hier abgesehen werden, da die Bezeichnungsweisen in den Artikeln über die betreffenden Verbindungsgruppen angegeben werden, und da fortdauernd für jede neuentdeckte Körperklasse noch weitere Nomenklatursysteme eingeführt werden. Im folgenden sollen nur diejenige Bezeichnungsprinzipien behandelt werden, die sich teils auf Grund der Genfer Vorschläge, teils durch den Gebrauch allgemein eingebürgert haben. Hierher gehört vor allem:

Die Bezeichnung der aliphatischen Kohlenwasserstoffe, die durch G. B.[1]) folgendermaßen geregelt worden ist.

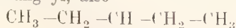
Die Endsilbe an dient zur Bezeichnung der gesättigten Kohlenwasserstoffe, und zwar werden für die vier ersten gesättigten normalen Glieder der Reihe CnH_{2n+2} die Namen Methan, Aethan, Propan, Butan beibehalten, die Namen der höheren Glieder von den griechischen Zahlwörtern hergeleitet, also Pentan, Hexan usw.

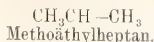
Aehnliche Bezeichnungen könnten auch soweit dies nötig für Stickstoffketten angewendet werden, NH_2-NH_2 Diazan, NH_2-NH-NH_2 Triazan usw., indessen sind ähnliche Namen für cyklische Stickstoffkohlenstoffverbindungen in Gebrauch.

Die Kohlenwasserstoffe mit verzweigter Kette werden als Abkömmlinge des längsten normalen, der sich im Molekül annehmen läßt, betrachtet, und seinem Namen die Bezeichnung des in der Seitenkette vorhandenen Kohlenwasserstoffrestes vorgesetzt.

Beispiel: $\begin{matrix} CH_3 \\ CH_3 \end{matrix} \rangle CH-CH_3$ Methylpropan. Die sonst übliche Bezeichnung der verzweigten Kohlenwasserstoffe als Isoverbindungen wird also überflüssig.

Ist auch die Seitenkette verzweigt, so wird auch ihr Name nach diesem Prinzip gebildet, nur erhalten die an ihr haftenden Kohlenwasserstoffreste die Endung o statt der Endung yl, also



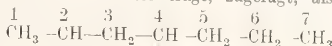


Methoäthylheptan.

Die Stellung der Seitenketten wird durch Zahlen bezeichnet, die angeben, an welchem C-Atom der Hauptkette die Seitenkette sitzt. Die Numerierung beginnt an dem einen, bei zwei symmetrisch gestellten bei dem der kohlenstoffärmsten Seitenkette am nächsten stehenden Ende der Hauptkette.

Dieser Beschluß wird gegenwärtig insofern häufig nicht eingehalten, da man nach einem Vorschlage Baeyers die Stellungen in offenen Ketten mit griechischen Buchstaben, ein Verfahren, das freilich auf Ketten von höchstens 24 Gliedern beschränkt ist.

Die C-Atome der Seitenkette werden ebenfalls und zwar von der Verbindungsstelle mit der Hauptkette aus numeriert, die sich ergebenden Zahlen werden als Indices der Nummer des C-Atoms der Hauptkette, das die Seitenkette trägt, zugefügt, also:





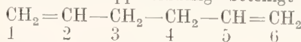
Sitzen zwei Seitenketten an demselben C-Atom, so wird bei der Namenbildung diejenige von geringster C-Atomzahl vorangestellt, die Numerierung erfolgt wie oben beschrieben, nur werden die Nummern der C-Atome der Seitenkette von geringerer C-Atomzahl akzentuiert.

Richter (Ber. 29, 586) schlägt statt der Akzente Unterstreichung der Indices vor, ist eine Seitenkette verzweigt, so erhalten die C-Atome der sekundären Seitenkette zwei Indices usw., sitzen an einem C-Atom drei Seitenketten, so sind die Indices der dritten doppelt zu unterstreichen.

In gleicher Weise sind die C-Atome von Seitenketten numeriert, die an cyklischen Atomketten sitzen.

Kann ein Kohlenwasserstoff in zwei Weisen bezeichnet werden, so wählt man die kürzeste.

Die ungesättigten Kohlenwasserstoffe mit einer Doppelbindung werden ebenso bezeichnet wie die gesättigten, erhalten jedoch die Endsilbe en statt an. Kohlenwasserstoff mit zwei oder mehreren Doppelbindungen erhalten die Endungen diën, triën usw. Die Stellen der doppelten (und ebenso der dreifachen) Bindungen bezeichnet man durch die Nummer des ersten C-Atoms der Kette, das an der Doppelbindung beteiligt ist.



Hexadien 1.5

Nach mehrfachen Vorschlägen (Combes, Tiemann) verlegt man, wenn zulässig, die Doppelbindung in die Hauptkette, während für den Fall, daß die Doppelbindung sich zwischen einem C-Atom der Seitenkette und einem C-Atom der Hauptkette befindet, der Hauptkette die Endung an, der Seitenkette die Endung en erteilt werden soll.

Aehnliche Nomenklatur benutzt man neuerdings für Stickstoffketten, so bezeichnet man Verbindungen R N=N-NR_2 als Triazene, dagegen leider immer noch die Verbindungen $R_2N-N=N-NR_2$ als Tetrazone, die 8gliedrigen Stickstoffketten als Oktazone usw.

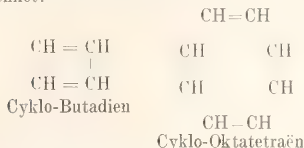
Die Namen der Kohlenwasserstoffe mit

[1]) G. B. bedeutet im folgenden die „Genfer Beschlüsse".

einer oder mehreren dreifachen Bindungen endigen auf in bezw. diin, triin usw., die Numerierung erfolgt bei ihnen nach den gleichen Prinzipien wie bei den gesättigten, sind Seitenketten nicht vorhanden, so beginnt die Numerierung an dem Ende, das einer der doppelten bezw. dreifachen Bindungen am nächsten ist.

Die Namen der cyklischen Kohlenwasserstoffe (Polymethylene $(CH_2)_n$ und die entsprechenden ungesättigten, nicht aromatischen Körper) werden gebildet, indem man dem Namen des entsprechenden offenen Kohlenwasserstoffs das Präfix cyklo voranstellt.

Die Genfer Beschlüsse sehen nur die Bezeichnung der Polymethylene vor, tatsächlich werden gegenwärtig alle C-Ringe außer den aromatischen wie angegeben bezeichnet:



Cyklo-Butadien Cyklo-Oktatetraën

über die Bezeichnung der Ringsysteme im allgemeinen vgl. weiter unten.

Ebenfalls allgemeine Annahme haben die teilweise direkt in Genf, teils später in gleichem Sinne festgesetzten Bezeichnungen der chemischen Funktionen gefunden, wir stellen die wichtigsten unter ihnen zusammen:

Die Namen der Alkohole und Phenole ROH werden gebildet, indem man dem Namen der Kohlenwasserstoffe, von denen sie sich ableiten, die Endung ol anhängt. Polyalkohole und Polyphenole werden als diole, triole unterschieden.

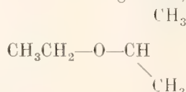
Gegen diese Regel wird im Deutschen insofern verstoßen, als einmal die Silbe ol bei Namen von Substanzen ohne Alkoholfunktion nicht ausgemerzt wird (Pyrrol, Benzol, Triazol, Anisol [ein Phenoläther]), sodann wird auch bei Alkoholen die Bezeichnung nicht streng durchgeführt (Methylalkohol statt Methanol), tertiäre Alkohole sieht man als Derivate des Methanols oder Carbinols CH_3OH.[1]) Wichtig ist die konsequent gebildete Bezeichnung von Körpern mit Gruppen $R—CH=C\begin{smallmatrix}OH\\R_2\end{smallmatrix}$ [2]) als Enole.[3])

Befindet sich die OH-Gruppe in der Seitenkette, so soll die Silbe ol dem Namen der Seitenkette angehängt werden.

Eine Ausnahme bilden die Hydrochinone, siehe weiter unten.

Die Merkaptane RSH werden als Thiole bezeichnet, bei mehreren SH-Gruppen heißen sie dithiole, trithiole usw.

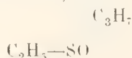
Die Namen der Aether $R_1—O—R_2$ sollen nach den G. B. so gebildet werden, daß man die Namen der Kohlenwasserstoffe, deren einwertige Radikale sie enthalten, durch die Silbe oxy verbindet, und zwar steht der Kohlenwasserstoff mit höherer C-Zahl an erster Stelle. Diese Regel wird aber durchaus nicht eingehalten, gewöhnlich wird im Deutschen der Name aus den Namen der Kohlenwasserstoffe und dem Worte Aether gebildet, also:



Aethylisopropyläther; häufig werden auch Eigennamen benutzt.

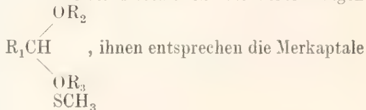
Die Namen der Sulfide R_1SR_2, Disulfide $R_1S—SR_2$ und Sulfone $R_1SO_2R_2$ (d. h. die am Schwefel esterifizierten Alkylsulfinsäuren) werden nach G. B. wie die der Aether gebildet, indem man zwischen die Namen der Kohlenwasserstoffe bezw. die Silben thio, dithio, sulfon setzt.

Die Verbindungen R_1SOR_2 werden als Sulfoxyde bezeichnet, z. B.



Aethylpropylsulfoxyd.

Die Namen der Aldehyde $R—C\begin{smallmatrix}O\\H\end{smallmatrix}$ werden gebildet, indem man den Kohlenwasserstoff die Endung al, bei Thioaldehyden thial hinzufügt. (Wiederum hat man di-, triale usw.), ist die $HC=O$ oder $HC=S$ Gruppe in der Seitenkette, so erhält diese die Endsilbe. Acetale sind die Verbindungen



$R_1CH\begin{smallmatrix}OR_2\\OR_3\end{smallmatrix}$, ihnen entsprechen die Merkaptale $R_1CH\begin{smallmatrix}SCH_3\\SCH_3\end{smallmatrix}$; im Sinne der Genfer Vorschläge wären diese Stoffe als Bisoxy- bezw. Bisthio-Kohlenwasserstoffe oder als Diäther vgl. oben zu bezeichnen. Also:



als Di-äthanoxyäthan.

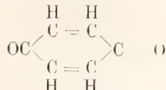
Die Ketone R_1R_2CO erhalten die Endung on, die Thioketone R_1R_2CS thion, Polyketone werden als dione, trione usw. (bezw.

[1]) Also $(C_6H_5)_3COH$ ist Triphenylcarbinol.

[2]) R_1, R_2 usw. bedeuten hier und im folgenden beliebige Kohlenwasserstoffreste.

[3]) Indessen ist auch bei vielen Körpern dieser Konstitution die Bezeichnung als Hydroxymethylenverbindungen gebräuchlich, z. B. für $(CH_3CO)_2C=CHOH$ Hydroxymethylenacetylaceton.

dithione, trithione) bezeichnet, eine Ausnahme machen die Diketone der aromatischen Verbindungen, z. B.



die als Chinone bezeichnet werden, die entsprechenden Phenole OHC_6H_4OH werden als Hydrochinone bezeichnet, Chinhydrone sind Additionsverbindungen von Chinonen mit Hydrochinonen.

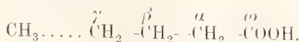
Die Additionsprodukte der Ketone mit Cyanwasserstoff, Halogenwasserstoff werden als Cyan-, Chlor- usw. Hydrine bezeichnet.

Die Namen der einbasischen aliphatischen (Carbon)-Säuren RCOOH werden nach G. B. gebildet, indem man den Namen der Kohlenwasserstoffe, von denen sie sich ableiten, die Endung säure, (eventuell di-, tri-, tetra säure) anhängt, und zwar wird das C-Atom der Carboxylgruppe COOH als integrierender Bestandteil des Stammkohlenwasserstoffs aufgefaßt. Für die aromatische Reihe ist eine Festsetzung nicht getroffen, zwar gebraucht man auch dort die Endung säure, zählt aber das C-Atom der COOH-Gruppe meist nicht zum Stammkohlenwasserstoff; also C_6H_5COOH = Benzoesäure nicht Toluolsäure.

Je nachdem in der $C\begin{smallmatrix}O \\ OH\end{smallmatrix}$-Gruppe das einfach gebundene, das doppelt gebundene oder beide O-Atome durch S ersetzt sind, heißen die schwefelhaltigen Säuren Thiol-, Thion- oder Thionthiolsäuren.

Bei den einbasischen Säuren der aliphatischen Reihe, die sich von gesättigten Kohlenwasserstoffen ableiten, beginnt die Numerierung mit dem C der COOH-Gruppe, in allen anderen Fällen sind die bei den Kohlenwasserstoffen gültigen Numerierregeln anzuwenden.

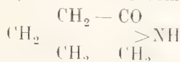
In praxi werden die C-Atome der aliphatischen Karbonsäuren nicht durch Zahlen, sondern nach einem Vorschlage v. Baeyers durch griechische Buchstaben bezeichnet und zwar nach dem Schema:



Die Namen der Metallsalze werden wie gewöhnlich gebildet, nach G. B. heißt also CH_3COONa (Natriumacetat, essigsaures Na) äthansaures Na. Die Verbindungen $R_1C\begin{smallmatrix}O \\ OR_2\end{smallmatrix}$ heißen Ester, bei S-haltigen Säuren hätte man Thiolester und Thionester. Die Bezeichnung der Ester als Säure äther ist leider auch noch im Gebrauch.

Die Verbindungen, die durch Verkettung reier COOH-Gruppen unter Wasseraustritt entstehen, $R_1\overset{O}{C}—O—\overset{O}{C}R_2$, heißen Säureanhydride.

Die inneren Anhydride der Oxycarbonsäuren, die Laktone, sollen nach den Genfer Beschlüssen durch Anfügung der Endung olid an den Namen des Stammkohlenwasserstoffs gekennzeichnet werden. Die verschiedenen Laktone werden entweder als α, β, γ usw. Laktone oder durch Zahlen, die die relative Stellung der CO-Gruppe zu dem das alkoholische O-Atom tragenden C unterschieden, also $\overset{4}{C}H_3\overset{3}{C}H_2\overset{2}{C}H_2\overset{1}{C}H_2CO$ (—O) als γ Valerolacton oder als Pentanolid 1,4. Die entsprechenden inneren Anhydride der Amidosäuren, die Laktame vom Typus:



werden durch keine einheitliche Kennsilbe bezeichnet.

Die inneren Salze der trisubstituierten Aminosäuren vom Typus $(CH_3)_3N—CH_2COO$ werden als Betaïne, nach G. B. durch die Endsilbe taïn bezeichnet, obige Verbindung also als Trimethyläthan 1,2 taïn.

Die Verbindungen $NR_1R_2R_3$ werden als substituierte Ammoniake aufgefaßt, wenn die R_1H oder Kohlenwasserstoffreste ohne weitere Funktion bedeuten, ihr Name wird dann gebildet, indem man den Namen der Kohlenwasserstoffreste das Wort „Amin" folgen läßt.

C_2H_5, CH_3, $C_6H_5CH_2$ > N = Methyl-Aethyl-Benzylamin;

analog heißen die Verbindungen R_3P, R_3As, R_3Sb Phosphine, Arsine, Stibine. Hat aber eines der R_1 weitere Funktionen, so wird meist der Aminrest als Substituent aufgefaßt und durch das Vorwort „Amino" oder Amido angezeigt. $NH_2CH_2CH_2COOH$ ist Aminopropansäure, und zwar sollte nach G. B. speziell bei Säuren nur Amino gebraucht werden.

Die Basen NR_4[1])OH (Ammonium-) $P.R_4OH$ (Phosphonium-), AsROH (Arsonium-), SbR_4OH (Stibonium-), SR_3OH (Sulfonium-), OR_3OH (Oxoniumbasen) werden durch die gemeinsame Endsilbe „onium" als ammoniumähnliche Basen gekennzeichnet, durch dieselbe Silbe kennzeichnet v. Baeyer auch die Salze $(Aryl)_3C—X$ als Salze einer „Carboniumbase".



Die Verbindungen CO heißen



1) R_4 vier verschiedene oder gleiche Alkyle oder H.

2) R_2 wie 1).

Harnstoffe bezw. Alkyl, oder Alkylharnstoffe, wenn die R_1-Alkyle oder Aryle, dagegen Ureïde, wenn sich unter ihnen Säurereste RCO befinden, bei komplizierten Derivaten ist es jedoch besser die Säureradikale[1]), durch die Endung „oyl" charakterisiert, wie Alkyle als Substituenten anzusehen. Die Verteilung der Substituenten wird hier, wie in vielen ähnlichen Fällen, durch a, a′, b, b′ bezeichnet. Die Verbindungen, welche sich von 2 Molekülen Harnstoff ableiten lassen, heißen Diharnstoffe bezw. Diureïde, die Harnstoffderivate, die eine COOH-Gruppe enthalten, heißen nach G. B. Ureïnsäuren (nicht Uramin oder Uramidosäuren). Die Verbindungen $CS = (NR_2)_2$ heißen Thioharnstoffe usw.



Die Verbindungen CNH(R) heißen Guanidine



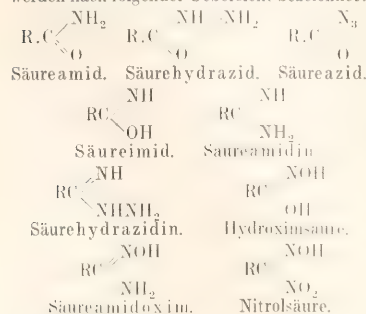
(Diaminodicarbimidine).

Die Verbindungen, die die Gruppe C=NH (Carbimidogruppe) enthalten, heißen Imidoverbindungen, der Name „imin" kommt dem Reste nach G. B. dann zu, wenn er eine Atomkette schließt, also sollte $HN(—CH_2COOH)_2$ Iminoessigsäure(Aethansäure) heißen. $HN(SO_3H)_2$ Iminosulfonsäure; $N(SO_3H)_3$ aber ist Nitrilosulfonsäure.

Die Verbindungen, die sich vom Hydroxylamin H_2NOH ableiten, werden durch die Endung „hydroxylamin" bezeichnet, doch werden die Verbindungen $R_2C = NOH$ bezeichnet, indem man nach G. B. dem Namen der Kohlenwasserstoffe in praxi aber dem der Aldehyde oder Ketone, von denen sie sich ableiten, die Endung „oxim" beifügt. Die G. B. unterscheiden also Aldoxime und Ketoxime nur durch Zahlen. Häufig findet man auch die Bezeichnung Isonitroso- oder Oximidoverbindungen für $R_2C{:}NOH$.

Die Verbindungen $R_2C = N$ - Aryl werden als Anile bezeichnet und ihr Name wie der der Oxime gebildet.

Die stickstoffhaltigen Karbonsäurederivate werden nach folgender Uebersicht bezeichnet:





Nitrosolsäure.

Nach G. B. werden die Endungen wieder dem Namen der Kohlenwasserstoffe angehängt (z. B. Aethansäureamid). Die Namen der Säureester, sowie der schwefelhaltigen Analogen sind leicht abzuleiten.

Wenn das C-Atom einer CN-Gruppe Bestandteil des Stammkohlenwasserstoffs ist, wenn also die CN-Gruppe an einem Ende der Hauptkette sich befindet, so heißen die betreffenden Verbindungen Nitrile (Dinitrile bei zwei CN). Dagegen heißen die aromatischen CN-Verbindungen Cyanaryle, also C_6H_5CN-Cyanbenzol, obgleich Combes und Tiemann längst vorschlugen, immer von Nitrilen zu sprechen. In praxi werden die Nitrile immer nach der Säure genannt, zu der sie sich verseifen lassen. Also CH_3CH_2CN Propionsäurenitril, C_6H_5CN Benzoesäurenitril (oder Benzonitril).

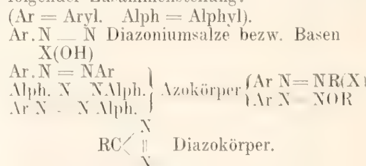
Die Verbindungen RNC sollen nach G. B. ausschließlich als Carbylamine bezeichnet werden (nicht mehr als Isonitrile).

Die Isocyansäureester RNCO sollen nach denselben Beschlüssen als Carbonimide, die Isothiocyansäureester RNCS als Thiocarbonimide (statt Senföle) bezeichnet werden. Cyansäure- und Thiocyansäureester heißen nur diejenigen Verbindungen, die sich zu Alkohol und Cyansäure (Thiocyansäure) verseifen lassen.

Die Verbindungen die die Gruppe NO_2 an Kohlenstoff gebunden tragen, heißen Nitrokörper, ist an demselben C-Atom noch Wasserstoff vorhanden, so lagern sie sich unter Umständen zu aci-Nitrokörpern $R.C = NOOH$ um.[1]) Die Verbindungen mit der Gruppe JO_2 am Kohlenstoff heißen analog Jodoverbindungen.

Die Verbindungen, die die Gruppen —NO und JO am Kohlenstoff gebunden enthalten, werden als Nitroso- bezw. Jodosoverbindungen bezeichnet.

Die Nomenklatur der Körper, die die Azogruppe N_2 enthalten, ergibt sich aus folgender Zusammenstellung:



RN = N.NR₂(HR) Aminoazokörper.
oder besser Triazene.

Die G. B., die sich auf die Anordnung der Kohlenwasserstoffe und Radikalnamen beziehen, werden nicht immer eingehalten.

[1]) Oder Acyle nach einer zuerst von Hofmann eingeführten Bezeichnung.

[1]) Weiteres vgl. Hantzsch und Voigt, Ber. 45. 85.

Im allgemeinen werden die Namen der betreffenden Reste durch die Silbe „azo“ verbunden.

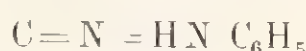
Die Namen der Verbindungen RN — NR

oder R—N=NR werden in gleicher Weise unter Benutzung der Silbe “Azoxy“ gebildet.

Die Verbindungen $R_2N—NH_2$ werden als as. (asymmetrische), diejenigen R—NH—NH—R als symm. (symmetrische) Hydrazoverbindungen (Hydrazine) bezeichnet, erstere sollen auch nach G. B. analog den substituierten Ammoniaken bezeichnet werden, letztere dagegen unter Benutzung der Verbindungssilbe „Hydrazo“, analog den Azokörpern.

Die Namen der Phenylhydrazone R_2-C = N — NHC_6H_5 werden nach G. B. gebildet, indem man den Namen der Kohlenwasserstoffe, in praxi aber meist der Aldehyde oder Ketone, von denen sie sich ableiten, die Endung phenylhydrazon anfügt. Die G. B. unterscheiden also Aldehyd- und Ketonphenylhydrazone nur durch die Numerierung. Die gewöhnlich als Osazone angesprochenen Verbindungen


C=N—NH C_6H_5


C=N=HN C_6H_5

sollten danach als Di- oder wohl besser Biphenylhydrazone bezeichnet werden.

Die Benennung der organischen Verbindungen mit komplexen Funktionen, die in den G. B. nicht vorgesehen wurde, erfolgt meist so, daß man die einzelnen Funktionsbezeichnungen mit ihrer Nummer der Reihe nach anführt, bezüglich der Reihenfolge haben Baeyer und Richter[1]) Vorschläge gemacht.

Allgemein angenommen sind die Bezeichnungen der einwertigen Kohlenwasserstoffradikale durch die Endung yl, der Säureradikale durch die Endung oyl. Nach Tiemann sollen Radikale mit Alkoholfunktion ylol, Ketonfunktion ylon, mit Säurefunktion ylsäure als Namenendung erhalten.

Ueber die Nomenklatur der aromatischen und heterocyklischen Ringsysteme liegen keine allgemein angenommenen Prinzipien wohl aber eine große Reihe von Vorschlägen vor. In der Regel erfolgt hier die Namenbildung nach dem Prinzip der Substitution, unter Zugrundelegung eines Eigennamens für die Stammsubstanz. Einige speziellere Regeln werden jedoch befolgt.

a) Bei den Benzolderivaten; für sie wurde schon in Genf beschlossen:

1. In den aromatischen Körpern wie in allen Körpern, die Atomringe enthalten, werden Seitenketten als Substituenten betrachtet, der Beschluß ist jedoch nicht allgemein durchgedrungen, dagegen werden stets

[1]) Ber. d. deutschen chem. Ges. 29. 586.

2. die C-Atome des Benzolkerns mit 1 bis 6 von links nach rechts bezeichnet. Die Numerierung beginnt bei Polysubstitutionsprodukten mit dem C-Atom, mit welchem von den direkt am Kern haftenden Seitenketten das Element mit kleinstem Atomgewicht verbunden ist, worauf die substituierenden Gruppen in der Reihenfolge des Anwachsens der Atomgewichte ihrer direkt mit dem Benzolring verbundenen Elemente angeführt werden.

Ist in mehreren Seitenketten dasselbe Element mit dem Kern verbunden, so richtet sich der Anfang der Numerierung bezw. die Reihenfolge, nach der steigenden Summe der Atomgewichte der übrigen Elemente, der betreffenden Seitenkette.

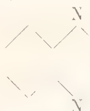
Sind zwei oder mehrere Seitenketten vorhanden, so wird die Numerierung so gewählt, daß die anderen Seitenketten möglichst kleine Indices erhalten.

Sind zwei Ringsysteme direkt oder indirekt miteinander verknüpft, so ist der Name des komplizierten zuerst anzuführen, die Nummern des letzteren zu akzentuieren.

b) Anzuführen ist hier ferner die allgemein angenommene Bezeichnung der Lage doppelter Bindungen in hydroaromatischen Körpern, die nach v. Baeyer durch Δ^x, wo x die Nummer des ersten an der Doppelbindung beteiligten C-Atoms ist, erfolgt.

c) Zur einheitlichen Nomenklatur heterocyklischer Körper sind von Richter[1]), Armstrong und zahlreichen anderen Forschern gemacht worden, ohne allgemeine Annahme zu finden, wichtig sind für die Bezeichnung der fünf- und sechsgliedrigen stickstoffhaltigen Ringe die Vorschläge von Widman[2]) geworden, die sich kurz folgendermaßen formulieren lassen.

Ein Azin ist jede sechsgliedrige aus C und N bestehende Verbindung, die einen von neun Bindungen zusammengehaltenen Kern enthält. Je nach der Zahl der Stickstoffatome hat man Di-, Tri-, Tetrazine, bei Diazinen unterscheidet man je nach der relativen Stellung der N-Atome Miazine (Metadiazine), Oiazine (Orthodiazine) und Piazine (Paradiazine). Angegliederte aromatische Ringe werden durch die abgekürzten Namen Phen, Tolu, Anthra, Naphto usw. bezeichnet, also:



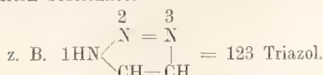
Phenpiazin.

Verbindungen, welche einen sechsgliedrigen aus einem N, einem O (oder S) und vier C-Atomen bestehenden, von acht Bindungen zusammen gehaltenen Kern enthalten, heißen Azoxine (Azthine) wiederum

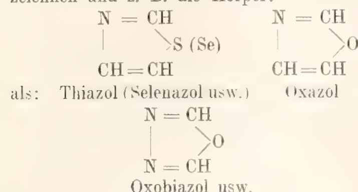
[1]) Ber. d. deutschen chem. Ges. 29. 586.
[2]) Journ. f. prakt. Chemie 38. 187.

könnte Miazoxine, Oiazoxine und Piazoxine unterscheiden — dieses Nomenklatursystem ist weiterer Ausbildung fähig.

Ein Azol ist jede Verbindung, die einen fünfgliedrigen aus N und C bestehenden, von sieben Bindungen zusammen gehaltenen Ring enthält. Die Stellungen werden durch Ziffern bezeichnet:



Es ist allgemein üblich geworden, auch andere stickstoffhaltige Fünfringe als Azole zu bezeichnen und z. B. die Körper:



zu bezeichnen, näheres hierüber findet man bei Richter, Lexikon l. c.

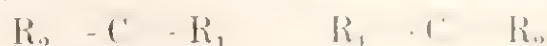
Verbindungen von veränderlicher Konstitution, insbesondere Pseudosäuren und Pseudobasen, werden nach Hantzsch folgendermaßen bezeichnet:

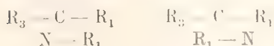
1. Bezieht sich der übliche Name auf die Pseudosäure (ψ-Säure), so wird die echte Säure aci-Form genannt. CH_2NOOH = aci-Nitromethan.

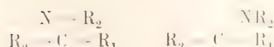
2. Bezieht sich der bisher übliche Name auf die echte Säure (echte Base), so wird der Name der Pseudosäure durch die Vorsilbe pseudo (ψ) gebildet. Die Ausdrücke pseudo und iso, deren ersterer danach nur auf umlagerungsfähige Körper anzuwenden ist, sind streng auseinanderzuhalten.

Stereoisomere Körper werden nach folgenden Prinzipien bezeichnet.

I. Geometrische Isomerie bei Verbindungen:







cis (syn) Formen anti (trans) Formen.

II. Isomerie durch asymmetrischen Kohlenstoff oder wegen Molekülasymmetrie:

Die Formen werden als d (Rechts-) und l (Linksformen) unterschieden. Die durch innere Kompensation inaktiven Formen heißen m (Meso-), die äquimolekularen Gemische beider aktiven Komponenten r (Racemische Formen).

Während es bisher noch nicht gelungen ist, ein völlig befriedigendes, rationelles System für die Textnomenklatur aufzustellen, wird für die Registernomenklatur gegenwärtig allgemein die zuerst von M. M. Richter empfohlene und in seinem Lexikon der Kohlenstoffverbindungen angewandte Registrierung nach Bruttoformeln angewendet. Dieses sogleich darzulegende System wird in der Tat allen Anforderungen gerecht, es erlaubt jede Verbindung rasch und sicher zu finden, kann auch solche Verbindungen umfassen, deren Konstitution wechselnd oder überhaupt ununtersucht ist, sofern nur ihre empirische Zusammensetzung bekannt ist, sie stellt keinerlei besondere Anforderungen an die Kenntnisse des Benutzers, läßt es frei, von welcher Stammsubstanz man den betreffenden Körper ableiten will und steht in keinerlei Gegensatz zu irgendwelcher Textnomenklatur.

Die Anordnung der Bruttoformel richtet sich:

a) in erster Linie nach der Anzahl der Kohlenstoffatome im Molekül;

b) in zweiter Linie nach der Anzahl der neben C im Molekül vorkommenden Elemente;

c) in dritter Linie nach der Art der neben C im Molekül vorkommenden Elemente im Sinne des chemischen Alphabets (vgl. weiter unten);

d) in vierter Linie nach der Anzahl von Atomen jedes einzelnen Elementes, das im Molekül neben C vorkommt.

In c) ist noch folgende Bestimmung getroffen:

Die mit C verbundenen, häufiger vorkommenden Elemente werden in der Bruttoformel in der Reihenfolge H, O, N, Cl, Br, J, F, S, P aufgeführt, sämtliche übrige Elemente reihen sich daran in der alphabetischen Reihenfolge ihrer Symbole an (chemisches Alphabet).

Zur Vervollständigung dieses Registers schlagen Jacobson und Stelzner weiter vor, erstens in einem alphabetischen Beiregister diejenigen organischen Verbindungen aufzuführen, denen eine empirische Formel nicht beigelegt worden ist, und zweitens, zur Erleichterung des Aufsuchens in ein Vorregister gleichfalls alphabetisch diejenigen komplizierteren organischen Verbindungen aufzunehmen, deren Bruttoformel aus dem gebräuchlichen Namen nicht ableitbar ist.

Als Beispiele für die Durchführung obigen Systems seien hier das genannte „Lexikon der Kohlenstoffverbindungen" von M. M. Richter, und die Formelregister der „Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft" genannt.

Literatur. *Vgl. die im Text zitierten Arbeiten.*

J. Lifschitz.

T.

Tait

Peter Guthrie.

Geboren am 28. April 1831 in Dalkeith bei Edinburgh, gestorben am 4. Juli 1901 in Edinburgh. Er war der Sohn des Privatsekretärs beim Herzog von Buccleuch, studierte in Cambridge und Edinburgh, wo er mit Maxwell Freundschaft schloß, wurde 1854 Professor der Mathematik an der Queens University in Belfast, 1860 Professor der Physik an der Universität Edinburgh. Tait hat außer mathematischen Abhandlungen zahlreiche experimentelle Untersuchungen geliefert auf den Gebieten der Wärmeleitung, Elektrizität, Luftspiegelung, für welch letztere er eine geometrische Theorie aufstellte. Mit W. Thomson (Lord Kelvin) zusammen führte er den Begriff der homogenen Deformation ein. In weiten Kreisen bekannt wurde sein Name durch seine Lehrbücher. Das mit W. Thomson herausgegebene Handbuch der theoretischen Physik ist in deutscher Uebersetzung mit einem Vorwort von Helmholtz erschienen.

Literatur. *Nekrolog von A. Macfarlane. Bibl. math.*, 4. — *G. Crystall, Professor Tait Nature* 64, *p. 305.*

E. Drude.

Talbot

William Henry Fox.

Geboren im Februar 1800 in Lacock Abbey bei Chippenham, Wiltshire, gestorben ebenda am 17. September 1877. Er lebte als Privatmann auf dieser seiner Besitzung. In den Jahren 1832 bis 1834 war er Parlamentsmitglied, seit 1831 Mitglied der Royal Society. Talbot ist der Erfinder der Photographie auf Papier — Talbotypie — und des Verfahrens zur Vervielfältigung der Lichtbilder. Er verlegt diese Erfindung in das Jahr 1834, veröffentlichte sie jedoch erst 1839. 1852 beschrieb er die Chromatgelatinetechnik für Photographie. Eine von ihm entdeckte Interferenzerscheinung trägt den Namen der „Talbotschen Streifen". Für die Vielseitigkeit seiner Interessen sprechen seine Abhandlungen auf dem Gebiet der Botanik, Archäologie und Literatur.

E. Drude.

Tardigrada.

1. Name. 2. Stellung im System. 3. Schlüssel zu den Gattungen. Arten. 4. Morphologie und Physiologie. 5. Entwickelung und Verwandlung. 6. Anpassung an Feuchtigkeit, Temperatur und Luftdruck. 7. Geographische Verbreitung und Vorkommen. 8. Parasiten. 9. Anweisung zum Sammeln.

1. Name. Das erste Bärtierchen ist 1773 von Pastor Goeze unter dem Namen „der kleine Wasserbär" beschrieben worden; er fand es in einem Bach. Seine Beschreibung und Abbildung lassen nicht mit Sicherheit erkennen, welcher Art es angehört. Spallanzani fand 1776 ein ähnliches Tier in einer Dachrinne und nannte es le Tardigrade. Auch der von Eichhorn 1781 beschriebene „Wasserbär" und O. F. Müllers „Bärtierchen" 1785 sind nicht hinreichend gekennzeichnet. Schranks Arctiscon tardigradum 1803 ist, nach Doyère, nicht mit dessen Milnesium tardigradum 1840 identisch. Arctiscon soll nach Schrank zweikrallige Füße und Antennen wie eine Raupe haben; es ist nie später ein derartiges Bärtierchen beobachtet worden. Daher ist die Bezeichnung der ganzen Gruppe als Arctiscoidea ungerechtfertigt. Pertys Bezeichnung derselben, Xenomorphidae, ist ohne jedes Kennzeichen veröffentlicht worden. Der Name Tardigraden ist zwar 1810 bereits von Illiger für die zahnarmen Säugetiere (Edenta, Bruta) vorgeschlagen — eine Bezeichnung, die längst der Vergessenheit anheimgefallen — Spallanzani aber hatte doch eben schon 1776 den Namen für ein Tier der in Rede stehenden Gruppe

festgelegt. Daher besteht Doyères Benennung Tardigraden vollkommen zu Recht.

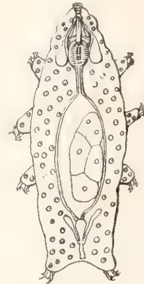
2. Stellung im System. Die Tardigraden sind keine Arachnoiden, überhaupt keine Arthropoden; ihre Fortbewegungsorgane sind ungegliederte, mehr oder weniger einziehbare Parapodien; bei Halechiniscus, Fig. 4,

1 bis 5 Marine Tardigraden.

6 bis 10 Süßwasser- und Land-Tardigraden.



1. Microlyda. Nach Dujardin.



6. Makrobiotus.



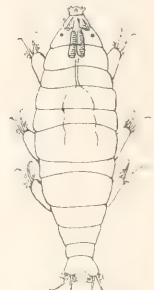
2. Echiniscoides.



3. Tetrakentron. Nach Cuénot.



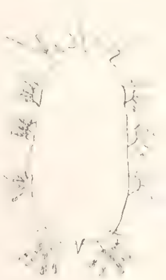
7. Diphascon.



8. Milnesium.



4. Halechiniscus. Die beiden Endabschnitte nicht ausgestülpt.



5. Batillipes.



9. Oreella. Nach Murray.



10. Echiniscus.

haben sie 4 Abschnitte, die teleskopartig ineinander einstülpbar sind. Sie dürften, wie v. Graff 1877 vorschlug, mit der Gruppe Linguatuliden und Myzostomiden zusammenzufassen und entsprechend Häckels Systematischer Phylogenie (Bd. II §§ 343, 347) als Gruppe der Anneliden aufzufassen sein.

3. **Schlüssel zu den Gattungen.**[1])

1. Mit einkralligen, gegliederten Beinen? (Fig. 1) . . . . Microlyda ?
   Parapodien mit 4 teleoskopartig ineinander einschiebbaren Abschnitten (Fig. 4) Halechiniscus
   Mit ungegliederten Parapodien 2
2. Parapodien mit Büscheln von 5 bis 6 schaufelförmigen Borsten (Fig. 5) . . Batillipes
   Parapodien mit 7 bis 9 nebeneinanderstehenden Krallen (Fig. 2) . . . . Echiniscoides
   Parapodien mit 4 Krallen 3
   Parapodien mit 2 Krallenpaaren 4
3. Ohne Kopfcirren 5
   Mit Kopfcirren 6
5. Ohne Abdominalcirren, 6+2 Palpen (Fig. 8). . . . . Milnesium
   Mit Abdominalcirren, 3 Tastzapfen, (Fig. 3) . . . . Tetrakentron
6. Rücken gepanzert (Fig. 10) . . . . Echiniscus
   Rücken ungepanzert (Fig. 9) . . . . Oreella
4. Mit kurzem Schlundrohr (Fig. 6) . . . . Makrobiotus
   Mit längerem, biegsamem Schlundrohr (Fig. 7) . . . . Diphascon

Arten. Nur eine Art haben folgende Gattungen: Milnesium tardigradum Doyère, Microlyda Dujardini Plate, Echiniscoides Sigismundi M. Schultze, Tetrakentron synaptae Cuénot, Halechiniscus Guiteli Richters, Batillipes mirus Richters, Oreella mollis Murray. Die Gattung Echiniscus zählt etwa 50 Arten, die nach dem Bau des Panzers, den Kopf- und Rumpfcirren und dem Bau der Krallen unterschieden werden. Die Gattung Makrobiotus umfaßt etwa 60 Arten, unterschieden nach dem Bau des Schlundkopfes (Form und Zahl der Chitineinlagerungen, bacilla) und der Krallen und nach den Eiern: glatte Eier, in abgestoßenen cuticulis abgelegt oder frei abgelegte Eier mit Dornen, Buckeln usw. Die Gattung Diphascon hat etwa 10 Arten, unterschieden nach dem Bau des Schlundkopfes und des Schlundrohrs. Insgesamt etwa 130 Arten.

4. **Morphologie und Physiologie.** Der $^1/_{10}$ bis 1 cm große Körper ist zylindrisch, bei manchen fast wurmförmig gestreckt. Das Integument besteht aus Cuticula und Hypodermis. Die Mundöffnung ist gelegentlich etwas ventralwärts verlagert, die Afteröffnung spaltförmig, ventral gelegen. Weitere Poren bei manchen zwischen den Krallen; Extremitätendrüsen (Schleimdrüsen?, Nephridien?). Die Cuticula ist entweder glatt, gekörnt oder mit netzförmigen Zeichnungen versehen; selten stachelig. In den Matrixzellen mancher Arten braunes Pigment, zumal bei Tieren von stark besonnten Fundstellen. Nur die Echiniscusarten haben einen aus paarigen und unpaaren Cuticularplatten zusammengesetzten Rückenpanzer (Fig. 10); schwache Andeutungen eines solchen bei Echiniscoides.

Die 4 Paare Fortbewegungswerkzeuge sind bei der großen Mehrzahl ungegliederte Stummelfüße (Parapodien). Ob Lydella (jetzt Microlyda Hay), die seit Boulengey 1849 nie wieder beobachtet worden ist, wirklich arthropodenartig gegliederte Beine hat, muß fraglich erscheinen. Ich vermute fast, daß Microlyda die Larve von Halechiniscus ist, den ich in Material von Cancale fand, woher höchstwahrscheinlich auch Boulengeys Aquarientiere stammten. Halechiniscus (Fig. 4) hat viergliedrige Fortbewegungsorgane, aber die Glieder sind nicht in der Weise der Arthropodenbeine gegeneinander beweglich, sondern werden teleskopartig ineinander geschoben wie die Abdominalglieder vieler Rotatorien. In Material von Villefranche sur mer fand ich 150 μ große Larven des Halechiniscus mit zwei so kleinen Krallen, daß sie bei schwacher Vergrößerung wohl eine Kralle vortäuschen konnten; die Sinneskolben neben den Kopfcirren maßen nur 12 μ.

Die Parapodien tragen Krallen. Nur Batillipes (Fig. 5) hat Büschel von 5 bis 6 Organen, die aus einem proximalen, borstenförmigen und einem distalen, schaufelförmigen Abschnitt bestehen. Halechiniscus (Fig. 4) hat 4 nebeneinander liegende Endorgane mit einem unteren borstenförmigen, vorn kolbig erweiterten und einem oberen krallenförmigen Abschnitt. Echiniscoides (Fig. 2) hat 7 bis 9 nebeneinander stehende, einfache Krallen. Das parasitisch lebende Tetrakentron (Fig. 3) hat 4 ganz rudimentäre, borstenförmige Krallen. Echiniscus (Fig. 10) hat in der Jugend 2, im

[1]) Die von Ehrenberg nur auf dem Mangel von Augen basierte Gattung Hypsibius muß wegfallen, weil Augen gelegentlich auch bei Individuen von Arten fehlen, die in der Regel Augen haben.

erwachsenen Zustand 4, bei manchen an der Unterseite mit bald nach vorn, bald nach hinten gerichteten Dornen versehene, kräftige Krallen. Oreella (Fig. 9) ebenfalls 4 Krallen. Milnesium (Fig. 8) hat 2 lange, dünne Krallen und 2 kurze, 2- bis 3dornige „Steighaken". Makrobiotus (Fig. 6) und Diphascon (Fig. 7) haben 2 Krallenpaare. Ein solches Krallenpaar ist, als durch Verwachsung von 2 Krallen entstanden, zu betrachten, denn bei Embryonen von Makrobiotus Hufelandi, echinogenitus und Harmsworthi sind die Krallen noch getrennt. Bei seitlicher Betrachtung ist das nicht zu sehen.

Die Krallen der Tardigraden leiten sich von den Borsten der Chaetopoden ab (vgl. Richters, Verh. d. deutsch. zool. Ges. 1909).

Manche Tardigraden sind augenlos; die Mehrzahl hat aus schwarzen oder roten Pigmentflecken zusammengesetzte Augen, zum Teil mit Linsen. Von Tastorganen finden sich: bei Echiniscus und Oreella jederseits 2 Mundcirren, zwischen denen eine Sinnespapille (fehlen bei Ech. imberbis); Batillipes hat außer diesen noch eine mediane Cirre; Echiniscoides 2 ganz minimale, Tetrakentron 3 Tastzapfen; Milnesium einen Kranz von 6 Mundpapillen und weiter hinten jederseits lateral noch eine kleine Papille. Bei Makrobiotus und Diphascon fehlen jegliche Cirren und Papillen. Kopfcirren und -papillen sind vorhanden bei Echiniscus: eine Cirre (bei cornutus dolchklingenförmig verbreitert) und daneben eine oft nur knopfartige Papille; bei Batillipes, Halechiniscus und Oreella stehen Cirre und Palpe auf einem gemeinschaftlichen Basalglied (vgl. manche Chaetopoden). Seitliche Sinnesorgane am Rumpf hat Echiniscus in Gestalt kurzer Zapfen, nur bei Ech. conifer; sonst als kurzere oder längere Cirren (vgl. Chaetopoden); diese stehen lateral zwischen den Panzerplatten. Das erste Paar a, Cirre und Palpe, ist allen Echinisceu eigen, b, c, d, e sind bei den verschiedenen Arten sehr verschieden ausgebildet. Der Panzer erscheint aus einer Kopfplatte I, meistens 4 Rumpfplatten II, III, IV, V und einer Endplatte VI zusammengesetzt. V und VI sind oft verwachsen. Der Endabschnitt zeigt oft am Rande einen Kleeblatteinschnitt (Fig. 10); dieser entspricht der Grenze zwischen V und VI, denn in ihm steht, wenn vorhanden, die Cirre e. Zuweilen ist die Trennung von V und VI nur durch den Mangel der Körnelung der Cuticula angedeutet. I und II sind ungeteilt; III, IV, V oft median geteilt. Zwischen den Hauptplatten finden sich Schaltplatten von verschiedener Zahl, Größe und Teilung. Die Panzerplatten tragen bei einigen Arten Anhänge (Fäden und Dornen). Das Endsegment des Tartigraden-Körpers hat oft laterale Cirren oder Dornen (Fig. 2, 3, 4, 5). Bei Batillipes und Oreella (Fig. 5, 9) ein medianer Enddorn. Der Verdauungstraktus beginnt mit einem, vorn wie ein Schröpfkopf gestalteten Mundrohr, das zu einem muskulösen Schlundkopf führt. Die Muskeln desselben (vgl. die Chaetopoden) bilden, nach Art der Fruchtfächer einer Orange, 3 Gruppen, die ein dreistrahliges Lumen zwischen sich lassen. Jeder orangenscheibenförmige Schlundkopfmuskel trägt bei den meisten Formen jederseits an der scharfen Kante sehr konstante — und daher für die Systematik wichtige — chitinöse Einlagerungen (bacilla) (Fig. 6), sechs in jedem Querschnitt. Vor dem Schlundkopf stehen meistens 2 säbelförmig gekrümmte oder gerade Zähne (Stilette) aus kohlensaurem Kalk (Fig. 6), in der Mehrzahl der Fälle auf claviculaförmigen „Trägern", die am Schlundrohr unterstützt sind und durch eine kräftige Muskulatur wippend in das Mundrohr eingeführt werden. Mit diesen Stiletten stechen die Tiere die Zellen der Moose, Flechten und Tange an und entleeren deren Chlorophyllbrei mittels des als Pumpe wirkenden Schlundkopfes (Fig. 6). Gelegentlich saugen die Tardigraden auch Rotatorien u. dgl. aus. Speicheldrüsen sind vorhanden (Fig. 6). Das Schlundrohr ist bei Diphascon (Fig. 7), in dessen Magen ich nie Chlorophyll beobachtete, sehr lang und biegsam. Tetrakentron lebt parasitisch an den Mundcirren von Synapta inhaerens. Bärtierchen fallen Difflugien (!) und der Amoeba terricola zum Opfer, wahrscheinlich wenn sie in asphyktischem Zustand liegen. Zirkulations- und Atemorgane sind nicht vorhanden. In der wasserhellen Körperflüssigkeit schwimmen isolierte Fettzellen, sogenannte Blutkörperchen, deren Zahl und Größe je nach dem Ernährungszustand und Alter verschieden ist. Bei Makrobiotus coronifer sind diese Fettzellen durch Lutein goldgelb gefärbt, wie Roßfett.

Die Tardigraden sind getrennten Geschlechts. Die weiblichen Geschlechtsorgane bestehen bei Makrobiotus (andere Gattungen sind kaum daraufhin untersucht) aus einem unpaaren Ovarium, das vorn an 2 Fäden aufgehängt ist und einem Ovidukt. Die männlichen Organe sind sehr ähnlich gebaut; die Spermatozoen haben Spitzenstück, Kopf-, Mittelstück und einen langen fadenförmigen Schwanz. Die Muskulatur zerfällt in eine dorsale und ventrale Partie und die Extremitätenmuskulatur. Die Muskelbänder bestehen aus protoplasmatischer und kontraktiler Substanz, zeigen Längs- aber keine Querstreifung. Die protoplasmatische Sub

stanz bildet auf der kontraktilen Hügel mit großem, runden Kern. An diesen Hügel treten die als kleine Platte endenden Nerven heran (Doyères Nervenhügel). Das Nervensystem besteht aus einem Gehirn, einem Unterschlundganglion, 4 Bauchganglien und den von diesen Organen ausgehenden Nerven (Näheres bei Basse).

Die Tardigraden unterliegen regelmäßigen Häutungen. Diese erstrecken sich auch auf die cuticulare Auskleidung des Mundrohrs und des Schlundkopfes. Die Zähne werden resorbiert und neu angelegt. Infolgedessen trifft man oft Individuen mit reduzierten Zähnen und einem kugeligen Schlundkopf ohne bacilla. Dies hat früher zu der irrtümlichen Annahme von „Simplexformen" geführt. Der Häutung geht bei vielen eine Eiablage vorher. Die Tiere legen die in all diesen Fällen ovalen, glatten Eier in die abgestoßene Oberhaut. Der Eiersack haftet wegen der an ihm befindlichen Krallen an Dingen der Umgebung und wird z. B. bei den Landtardigraden nicht durch Regengüsse aus den Moospolstern an vielleicht für die Ernährung der ausschlüpfenden Jungen ungünstige Orte ausgeschwemmt. Andere Makrobioten legen ihre Eier einzeln und frei ab; diese sind (M. coronifer ausgenommen) kugelig und mit Stacheln und Buckeln versehen, die das Haften der Eier begünstigen. Nur Makrobiotus antarcticus legt glatte, kugelige Eier; diese haben eine klebrige Oberfläche.

5. Entwickelung und Verwandlung. Die Entwickelung im Ei ist nur bei Makrobiotus macronyx durch v. Erlanger untersucht worden. Die Echiniscusarten (ob alle?) schlüpfen als Larven mit 2 Krallen aus und vervollständigen ihre Ausstattung mit Körperanhängen erst im Laufe einer Metamorphose.

6. Anpassung an Feuchtigkeit, Temperatur und Luftdruck. Beim Austrocknen der Moospolster verfallen die Tardigraden in einen Trockenschlaf, der jahrelang dauern kann, ohne das Leben des Tieres zu gefährden. Die wasserbewohnenden Formen scheinen hierzu nicht befähigt zu sein. Uebergießt man ein im Trockenschlaf liegendes Bärtierchen mit Wasser, so quillt es auf und verharrt anfangs in einem asphyktischen Zustande, in dem es eine bequeme Untersuchung gestattet. Durch Rütteln und Stoßen erwachen die Tiere. Ungünstige Existenzverhältnisse sind es offenbar, die manche Land- und Süßwassertardigraden veranlassen, sich zu encystieren. In diesen Cysten geht eine „Umschmelzung" des Körpers vor sich. Die Organe verflüssigen sich — wie es scheint mit Ausnahme der Augen und Fettzellen — und regenerieren sich dann wieder.

Die Tardigraden ertragen sehr hohe Kälte- und Wärmegrade ohne Schädigung.

Die Luftdruckverhältnisse scheinen sie nicht zu tangieren; Milnesium tardigradum findet sich am Meer und in 4000 m Höhe.

7. Geographische Verbreitung und Vorkommen. Bei so gearteten Tieren sind die Vorbedingungen für eine weite geographische Verbreitung vorhanden. Mehrere Arten, u. a. Makrobiotus Hufelandi und Oberhäuseri, Echiniscus suillus und Wendti, Milnesium tardigradum sind Kosmopoliten. Die gemäßigten und zumal die Polarzonen sind reich an Tardigraden; die Tropen sind arm an ihnen, auch in bezug auf Individuenzahl.

Tardigraden leben in Polstern von Moosen, Flechten und einigen Phanerogamen, an Bäumen und Felsen, auch auf ebener Erde; sie bevorzugen sonnige Lage. Sie finden sich ebenfalls im Süßwasser zwischen Moosen und Wasserpflanzen. Mancher Landform begegnet man gelegentlich auch im Wasser (Makrobiotus furciger, hyalin in Moosen, braungebändert im Boeckella-See; vgl. Wissensch. Ergebn. d. schwed. Südpolar-Exp.). Das Meer beherbergt besonders interessante Formen; zurzeit kennt man 7 marine Arten.

8. Parasiten. Land- und Süßwassertardigraden sind oft gestopft voll Haplosporidien.

9. Anweisung zum Sammeln. Um moosbewohnende Tardigraden zu sammeln, schwenkt man kleine Moosbrocken mit der Pinzette in Wasser ab, läßt absetzen und trennt durch ein Sieb von geeigneter Maschenweite noch die gröberen Pflanzenteile vom Untersuchungsmaterial, das man tropfenweise bei etwa 30facher Vergrößerung untersucht. Beim Sammeln von marinen und Süßwassertardigraden läßt man die Tange und Süßwasserpflanzen einige Zeit in 5 prozentiger Formollösung stehen, schwenkt dieselben kräftig in dieser Lösung ab, läßt absetzen und siebt den Bodensatz durch. Zur Isolierung der einzelnen Individuen bei Lupenvergrößerung bedient man sich am besten eines Strahls aus der äußeren, steifen Fahne einer Schwungfeder, den man mit Siegellack an einem Stäbchen befestigt; ein solcher Strahl hat den richtigen Grad der Zartheit und Elastizität.

Literatur. ***Goeze***, *Abhandlungen aus der Insektologie. Halle a. S. 1773.* — ***Spallanzani,*** *Opuscules de physique. Genf [illegible].* — ***Eichhorn***, *Kleinste Wassertiere. Berlin 1781.* — ***O. F. Müller,*** *Archiv der Insektengeschichte. Zürich [illegible].* — ***Schrank,*** *Fauna boica III, 1803.* — ***C. A. S. Schultze***, *Makrob. Hufelandi. Berlin 1834, Echiniscus Bellermanni 1840, E. Creplini 1861.* — ***Ehrenberg***, *[illegible], Abh. Akad. Wissensch.*

Berlin 1848, 1853, 1859. — **Dujardin,** *Ann. sc. nat. 1838, 1851.* — **Doyère,** *Ann. sc. nat 1840.* — **Greeff,** *Arch. mikr. Anat. 1865, 1866.* — **Plate,** *Zool. Jahrb. 1888.* — **Cuénot.** *Revue biol. Nord de la France 1892.* — **v. Erlanger,** *Biol. Zentralblatt 1894, 1895.* — **Lance,** *Inaug. Diss. Paris 1896.* — **Scourfield,** *Proc. Zool. Soc. London 1897.* — **Richters,** *Bericht Senckenbg. Ges. 1900, 1902, 1904, 1908, 1909; Fauna arctica 1904; Verh. deutsch. zool. Ges. 1903, 1909; Zool. Anzeiger 1903, 1904 (2), 1906, 1907 (2), 1908, 1909, 1910, 1911; Zool. Jahrb. 1908; Mikrokosmos 1908, 1910; Deutsche Südpolarexpedition 1907; Wissenschaftl. Ergebn. der schwed. Südpolarexpedition 1908; Duc d'Orléans, Campagne de 1907, 1911; Avifauna Spitzbergensis, 1911.* — **Schaudinn,** *Fauna arctica 1901.* — **Murray James,** *Ann. Scottish Nat. Hist. 1905, 1906 (2); Transact. Royal Soc. Edinburgh 1905, 1906, 1907 (3); Zoologist 1907; Journ. Roy. Micr. Soc. 1907 (2), 1913; Journ. Quekett. Club. 1907, 1911; British Antarctic Exp. 1910.* — **Reukauf,** *Prometheus 1905; Zool. Anz. 1912 (2), Centralbl. f. Bakteriol. 1912.* — **Basse,** *Zeitschr. f. w. Zool. 1905.* — **Lauterborn,** *Verh. d. deutsch. zool. Ges. 1906.* — **Sellnick,** *Schriften d. Phys. Oek. Ges. Königsberg 1908.* — **Ammann,** *Inaug. Diss. Bern 1908.* — **Heinis,** *Zool. Anzeiger 1908 (3); Arch. f. Hydrobiologie 1910.* — **Carlzon,** *Zool. Anzeiger 1909.* — **Thulin,** *Arkiv för Zoologi 1911.*

F. Richters.

Tausendfüße.

Eine der Hauptgruppen der Gliedertiere, mit sehr gleichartig gegliedertem Körper und Gliedmaßenpaaren von vorn bis hinten versehen, durch Tracheen atmend und auf dem Lande lebend. Vgl. den Artikel „Myriapoda“.

Teer.

1. Definition. 2. Zusammensetzung. 3. Verschiedene Teerarten: a) Holzteer. b) Torfteer. c) Braunkohlenteer. d) Schieferteer. e) Steinkohlenteer.

1. **Definition.** Zahlreiche organische Stoffe, namentlich solche von hohem Molekulargewicht, erleiden, wenn sie unter Luftabschluß erhitzt werden, eine tiefgreifende Zersetzung. Neben einem kohligen Rückstand erhält man dabei stets Gasgemische von wechselnder Zusammensetzung, ferner wässerige und ölige Destillationsprodukte. Diese öligen Zersetzungsprodukte bezeichnet man als „Teere“, den Zersetzungsvorgang selbst nennt man „trockene Destillation“ oder besser „Zersetzungsdestillation“. Die Zersetzungsdestillation ist ein Prozeß von großer technischer Bedeutung; er wird mit einer Reihe von Naturprodukten, ebenso wie mit verschiedenen Abfallstoffen, in größtem Maßstabe in der Industrie durchgeführt, so zur Gewinnung von Essigsäure, Methylalkohol (Holzgeist), Azeton, Paraffin, zur Erzeugung von Leuchtgas und Koks, von Harzöl, Knochenkohle und anderen Stoffen. Die Ausgangsmaterialien zur Gewinnung dieser Stoffe sind Holz, Torf, Braunkohle, bituminöse Schiefer, Steinkohle, Harze und Knochen, und dementsprechend bezeichnet man auch die dabei entstehenden Teere je nach ihrer Herkunft als Holzteer, Torfteer, Braunkohlenteer, Schieferteer, Steinkohlenteer, während die bei der trockenen Destillation von Harzen und Knochen erhaltenen öligen Produkte Harzöl oder Tieröl genannt werden. Dazu kommen noch der Oelgasteer und der Wassergasteer als Nebenprodukte der Fabrikation von Oelgas oder von ölkarburiertem Wassergas.

2. **Zusammensetzung.** Die physikalischen Eigenschaften und die chemische Zusammensetzung der Teere sind nicht nur von dem Ausgangsmaterial, sondern in hohem Maße auch von den bei der Destillation vorherrschenden Bedingungen, in erster Linie von der Höhe der Temperatur, ferner aber auch von dem Druck und der Destillationsdauer, abhängig. Die Teere sind von brauner bis tiefschwarzer Farbe, sie haben einen intensiven, charakteristischen Geruch und ein spezifisches Gewicht von 0,85 bis 1,20. Sie sind teils dünnflüssig, teils dickflüssig, je nach der angewandten Destillationstemperatur; auch der Flammpunkt ist in hohem Maße von der Destillationstemperatur abhängig. Denn bei rascher und hoher Erhitzung des Rohmaterials wird ein beträchtlicher Teil des Teers zersetzt, indem namentlich die leichten Oele in permanente Gase und Kohlenstoff gespalten werden. Ein solcher Teer ist infolge des hohen Pechgehaltes dickflüssig, er hat ein hohes spez. Gewicht und einen hohen Flammpunkt. Das Gegenteil ist der Fall, wenn die Teerbildung bei langsamer Erhitzung und bei niedriger Temperatur vor sich gehen konnte. Ebenso verhält es sich mit den chemischen Eigenschaften; je höher die Destillationstemperatur ist, um so stärker treten sekundäre Zersetzungen ein sowie eine Wiedervereinigung von Zersetzungsprodukten miteinander, so daß die Teere äußerst komplizierte Gemenge zahlreicher Verbindungen darstellen, deren Trennung und Identifizierung zum Teil bis heute noch nicht gelungen ist. Jedenfalls steht fest, daß die Bildung aromatischer Stoffe im Teer durch Anwendung hoher Temperaturen bedingt ist, während bei niedriger Destillationstemperatur vorwiegend alipha-

tische Verbindungen entstehen. Durch nachträgliche Ueberhitzung können diese auch in aromatische Stoffe umgewandelt werden.

3. Verschiedene Teerarten. 3a) Holzteer entsteht bei der Verkohlung des Holzes in Meileröfen (Rußland, Schweden), in geschlossenen eisernen Retorten sowie in sogenannten Wagen- oder Röhrenöfen. Aus 100 kg lufttrockenem Holz erhält man 3,5 bis 5,5 kg Teer. Die prozentische Zusammensetzung der aus verschiedenen Holzarten bei einer Destillationstemperatur von weniger als 400° gewonnenen Teere ist nach Klason, Heidenstam und Norlin die folgende:

	C %	H %	O + N %	Verbrennungswärme Kal.
Kiefernholz	68,4	6,9	24,7	7405
Fichtenholz	66,1	7,2	26,7	7125
Birkenholz	65,2	7,0	27,8	7080
Buchenholz	61,8	6,5	31,7	6395

Der relativ hohe Gehalt an sauerstoffhaltigen Verbindungen (vgl. Kolumne 3 der Tabelle) ist für den Holzteer charakteristisch. Buchenholzteer enthält neben wenig aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen hauptsächlich Verbindungen von saurem Charakter, wie Phenole und deren Ester (p-Kresol, m-Xylenol, Guajacol, Kreosol, Dimethyläther der Pyrogallussäure), ferner auch Fettsäuren und deren Ester. Diese Stoffe, die alle ziemlich hoch sieden (180 bis 300°), werden durch Destillation von den Kohlenwasserstoffen getrennt, wobei leichte und schwere Teeröle erhalten werden. Aus letzteren, namentlich aus der zwischen 200 und 220° siedenden Fraktion, gewinnt man das Kreosot, aus welchem wiederum Kreosol und Guajacol isoliert werden. Diese beiden Verbindungen haben desinfizierende Eigenschaften und werden auch innerlich in der Medizin häufig verwendet. Der rohe Holzteer dient vielfach als Desinfektions- und Anstrichmittel, namentlich zur Konservierung von Holz.

Nadelholzteer, besonders der Kiefernholzteer, ist durch seinen Harzgehalt wertvoller als Laubholzteer; er liefert das terpentinölhaltige Kienöl, das zur Herstellung von Firnissen und Lacken dient. Das aus dem Birkenteer durch Destillation gewonnene Teeröl wird bei der Bereitung des russischen Juchtenleders benützt.

3b) Torfteer. Da die Produktion an Torfteer bisher sehr gering war, sind auch nähere Angaben über seine Zusammensetzung sehr spärlich. Aus 100 kg lufttrockenem Torf erhält man bei der Destillation in einer Retorte oder in einem geschlossenen Ofen 2 bis 4,5 kg eines schwarzen, schmalzartigen Teers von durchdringendem Geruch. Sein spezifisches Gewicht ist etwas niedriger als 1, sein Schmelzpunkt liegt bei 28 bis 30°. Ein nach dem Verfahren von Wielandt in Elisabethfehn (Oldenburg) gewonnener Torfteer hatte nach R. Löbel bei gewöhnlicher Temperatur eine butterartige Konsistenz, eine braunschwarze Farbe und einen penetranten Geruch. Bei der Destillation, die bei 90° begann, entwickelten sich ziemlich Mengen Schwefelwasserstoff, ferner zeigte sich, daß in den niederen und mittleren Fraktionen vorwiegend aromatische Stoffe auftreten, während in den höheren Fraktionen die aliphatischen vorherrschen. Die bei der Destillation erhaltenen Neutralöle bestanden zu 40 bis 45% aus Olefinen, zu 30 bis 35% aus aromatischen Kohlenwasserstoffen und zu 25 bis 30% aus Paraffinen. Die Phenole enthielten vorwiegend Karbolsäure und nur wenig Methoxylverbindungen, daneben finden sich im Torfteer auch Fettsäuren, in den höheren Fraktionen auch ungesättigte. Von Basen wurden namentlich Homologe des Pyridins nachgewiesen, so Pikoline und Lutidine. Der Torfteer wird in rohem Zustande zur Holzkonservierung verwendet oder zur Gewinnung von leichten und schweren Oelen, von Paraffin, Kreosot und Asphalt destilliert.

3c) Braunkohlenteer. Braunkohlenteer hat Aehnlichkeit mit dem Torfteer, ist jedoch durch seinen größeren Gehalt an Paraffin charakterisiert. Er ist gelblichbraun bis dunkelbraun von unangenehmem Geruch, und bei gewöhnlicher Temperatur von butterartiger Konsistenz. Sein Schmelzpunkt liegt zwischen 25 und 30° C., das spezifische Gewicht meist zwischen 0,85 und 0,91 (bei 35° R. bestimmt). Von den Bestandteilen des Braunkohlenteers sind in erster Linie die Paraffin-Kohlenwasserstoffe (C_7H_{16} bis $C_{23}H_{48}$ und noch höher) zu nennen, neben denen in kleinerer Menge auch ungesättigte sowie aromatische Kohlenwasserstoffe (Naphthalin) und Naphthene vorkommen. Von sauerstoffhaltigen Körpern wurden Phenol, Kresole und Guajacol gefunden, von stickstoffhaltigen Verbindungen wurden Pyridin und seine Homologen, ferner in sehr geringer Menge auch Chinolin isoliert, von schwefelhaltigen Körpern schließlich Schwefelwasserstoff neben wenig Schwefelkohlenstoff, Tiophen und Merkaptanen.

Die Teerausbeute bei der Destillation der bituminösen Braunkohle in Schwelöfen beträgt 3 bis 6%. Der erhaltene Braunkohlenteer ist namentlich durch seinen Gehalt an Paraffin und an Mineralölen von großem Wert. Er ist nicht, wie der Holz-

und Torfteer und auch wie der Steinkohlenteer, ein Nebenprodukt, sondern das Hauptprodukt der Braunkohlendestillation und bildet die Grundlage einer hauptsächlich in Sachsen und Thüringen blühenden Industrie, die in den 50 er Jahren des vorigen Jahrhunderts ins Leben gerufen wurde. Bei der ersten Destillation des Teeres erhält man nach Scheithauer 33% Rohöl, 60% Paraffinmasse, 3% Parraffinschmiere und rote Produkte, 2% Blasenkoks und 2% Destillationsgase.

Aus dem dunkelbraunen, zwischen 100 und 350° siedenden Rohöl erhält man durch wiederholte Fraktionierung und durch Behandlung mit chemischen Reinigungsmitteln sogenanntes Braunkohlenteerbenzin, ferner Solaröl, Gelböl (helles Paraffinöl), Rotöl und Fettöl. Das Solaröl dient heute nur noch in geringem Umfang zu Beleuchtungszwecken und wird in besonders konstruierten Lampen verbrannt; dagegen hat seine Verwendung zum Betrieb von Motoren in letzter Zeit zugenommen. Das Gelböl wird als Putzmittel und zur Herstellung von Wagenfetten verwendet, während die beiden höheren Fraktionen als Gasöle zur Carburierung von Wassergas und zur Herstellung von Oelgas (Fettgas zur Beleuchtung der Eisenbahnwagen), zum Betrieb von Dieselmotoren, sowie als Schmieröle von Bedeutung sind. Wichtiger als die Oele ist aber das Paraffin, das durch Abkühlen und Abpressen von dem Oel getrennt wird. Es ist eine farb- und geruchlose, kristallinische durchscheinende Masse und kommt als Weichparaffin (F. P. 35 bis 50°) und Hartparaffin (F. P. 50 bis 62°) in den Handel. Es dient hauptsächlich zur Herstellung von Kerzen, daher sind den sächsisch-thüringischen Mineralöl- und Paraffinfabriken auch häufig Kerzenfabriken angegliedert. Von anderen Verwendungsarten des Paraffins seien noch die Imprägnierung von Zündhölzern, Papier, Stoffen und Leder, ferner seine Verwendung zur Isolierung und in der pharmazeutischen Industrie erwähnt.

3d) Schieferteer. Der aus bituminösen Schiefern (Schottland) und aus der bituminösen Kohle der Grube Messel (bei Darmstadt) gewonnene Teer ist dem Braunkohlenteer sehr ähnlich. Der schottische Schieferteer ist braunrot und schmilzt zwischen 20 und 30°; sein spezifisches Gewicht liegt zwischen 0,86 und 0,90. Vor dem Braunkohlenteer zeichnet er sich durch einen höheren Stickstoffgehalt aus und liefert daher auch bei der Destillation mehr stickstoffhaltige Verbindungen (Pyridin und Chinolin). Der Messeler Teer ist grünlichbraun und hat eine salbenartige Konsistenz, sein spezifisches Gewicht beträgt 0,855 bis 0,860 (Scheithauer). Er wird ebenfalls auf Paraffin, Gasöle und Schmieröle verarbeitet.

3e) Steinkohlenteer. Der Steinkohlenteer ist von allen Teerarten in wissenschaftlicher Hinsicht am interessantesten und in technischer Hinsicht am wichtigsten. Er gehört zu den chemischen Stoffen, die mit am häufigsten und genauesten untersucht wurden. Mehrere hundert Verbindungen wurden bereits aus ihm isoliert und doch gelingt es, immer noch neue Destillationsprodukte in ihm nachzuweisen, wie die im Jahre 1910 durch Weißgerber erfolgte Auffindung des Indols beweist. Wie für den Holzteer und den Torfteer das überwiegende Vorkommen von sauerstoffhaltigen Verbindungen und für den Braunkohlen- und Schieferteer der hohe Gehalt an Paraffinkohlenwasserstoffen charakteristisch ist, so ist der Steinkohlenteer durch das überwiegende Vorkommen von Kohlenwasserstoffen der aromatischen Reihe gekennzeichnet. Daneben finden sich aber auch hier noch andere neutrale Verbindungen und ebenso saure und basische Bestandteile in großer Zahl. Von den neutralen Verbindungen seien neben den aromatischen Kohlenwasserstoffen nur die folgenden genannt: Alkohol, Azeton, Benzonitril, Cumaron, Carbazol und in geringer Menge auch aliphatische Kohlenwasserstoffe. Von den aromatischen Kohlenwasserstoffen sind am wichtigsten:

Benzol C_6H_6	Durol $C_{10}H_{14}$	Fluoren $C_{13}H_{10}$
Toluol C_7H_8	Styrol C_8H_8	Anthrazen $C_{14}H_{10}$
Xylole C_8H_{10}	Naphthalin $C_{10}H_8$	Phenanthren $C_{16}H_{10}$
Mesitylen C_9H_{12}	Diphenyl $C_{12}H_{10}$	Pyren $C_{16}H_{10}$
ps-Cumol C_9H_{12}	Acenaphthen $C_{12}H_{10}$	Chrysen $C_{18}H_{12}$

Von den sauren Bestandteilen des Steinkohlenteers sind zu nennen das Phenol und die drei Kresole, von den basischen Bestandteilen Pyridin, Chinolin und Akridin.

Ueber die Bildung des Teers bei der Zersetzungsdestillation der Steinkohle besteht noch wenig Klarheit. Berthelot beobachtete schon vor etwa 50 Jahren, daß Azetylen sich beim Durchleiten durch glühende Röhren zu Benzol polymerisiert und daß dabei durch weitere Kondensation und gleichzeitige Wasserstoffabspaltung auch Naphthalin und Anthrazen entstehen. Auf Grund dieser Beobachtungen vertrat Berthelot die Ansicht, daß das bei der Destillation der Steinkohle neben anderen Gasen entstehende Azetylen für die Bildung des Teeres von wesentlicher Bedeutung sei. In neuester

Zeit hat Rich. Meyer (Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft 1912, S. 1609 bis 1633) die Versuche Berthelots wiederholt und durch Erhitzen von Azetylen auf 650° C. einen Teer erhalten, in dem neben Benzol und Naphthalin, die in beträchtlicher Menge vorhanden waren, Toluol, Anthrazen, Inden, Biphenyl, Fluoren, Pyren und Chrysen scharf charakterisiert werden konnten. Hiernach scheinen die aromatischen Teerbestandteile durch pyrogene Kondensationen von Azetylen, Methan und anderen aliphatischen Kohlenwasserstoffen entstanden zu sein, wenngleich man auf Grund der Untersuchungen von Pictet und Ramseyer, denen es gelang, aus einer fetten Gaskohle durch Extraktion Hexahydrofluoren zu isolieren, annehmen darf, daß auch in der Kohle selbst schon aromatische bezw. hydroaromatische Stoffe enthalten sind, die bei der Zersetzungsdestillation der Kohle wahrscheinlich auch einen Teil der Benzolderivate des Teers liefern. Allem Anschein nach spielt die Azetylenkondensation dabei aber eine wichtigere Rolle.

Steinkohlenteer wird hauptsächlich bei der Destillationskokerei und der Fabrikation des Leuchtgases gewonnen (Kokerei- oder Zechenteer und Gasteer), ferner sind noch zu unterscheiden der Generator- und Hochofenteer, die jedoch beide für deutsche Verhältnisse nicht in Betracht kommen, da bei uns sowohl die Kraftgasgeneratoren wie die Hochöfen nicht mit Kohle, sondern fast stets mit Koks betrieben werden. Während früher die Hauptmenge des Teers von den Gasanstalten geliefert wurde und die Kokereien nur einen kleinen Bruchteil der Produktion lieferten, ist heute das Verhältnis gerade umgekehrt. Bis zum Ende der 50er Jahre des vorigen Jahrhunderts war der Steinkohlenteer ein sehr lästiges Nebenprodukt, als jedoch um diese Zeit die ersten künstlichen Farbstoffe, das Mauvein und das Fuchsin, aus dem Teer dargestellt wurden, schenkte man diesem Nebenprodukt erhöhte Beachtung. Bald stieg die Nachfrage nach Teer so sehr, daß große Mengen aus England eingeführt werden mußten, heute sind wir jedoch dank der außerordentlich lebhaften Entwickelung der Kokereiindustrie in der Lage, den großen Teerbedarf der Farbenfabriken und anderer Industriezweige im Inland zu decken. Die Verarbeitung des in den Gasanstalten und Kokereien erzeugten Teers erfolgt in der Regel in besonderen „Teerfabriken“, wo der Teer nach vorheriger Entwässerung durch Destillation in zahlreiche wertvolle Produkte zerlegt wird.

Das spez. Gewicht des Steinkohlenteers liegt zwischen 1,10 und 1,25. Gasteer ist in der Regel schwerer als Kokereiteer, doch ist dieser Unterschied und ebenso auch der Unterschied in der chemischen Zusammensetzung dieser beiden Teerarten heute nicht mehr so groß wie in früheren Jahren, seitdem das Leuchtgas nicht mehr in den alten kleinen Retorten, sondern in Vertikal- und Kammeröfen hergestellt wird. In Benzol und anderen Lösungsmitteln ist der Teer zum Teil löslich, der ungelöste Rückstand ist „freier Kohlenstoff“, der dem Teer die schwarze Farbe gibt. Die Teerausbeute aus 100 kg Kohlen beträgt 3 bis 6 kg. In rohem Zustand wird der Teer zur Fabrikation von Dachpappe, als Anstrichmittel für Holz, Mauerwerk und Metall, als Heizmaterial (selten) und in neuerer Zeit in steigendem Maße zur Teerung der Landstraßen benutzt, um den namentlich durch den gesteigerten Automobilverkehr hervorgerufenen Staub zu binden.

Viel wichtiger als diese Verwendungsarten ist jedoch die Destillation, die in großen eisernen Blasen vorgenommen wird. Der entwässerte Teer wird dabei zunächst in vier Fraktionen zerlegt: 1. das Leichtöl (S. P. bis 170°), 2. das Mittelöl (S. P. 170 bis 230°), 3. das Schweröl (S. P. 230 bis 270°), 4. das Anthrazenöl (S. P. 270 bis 400°), als Rückstand erhält man eine schwarze, bei gewöhnlicher Temperatur feste Masse, das Pech. Das Leichtöl wird durch Behandeln mit Natronlauge und konzentrierter Schwefelsäure gereinigt und hierauf durch wiederholte Destillation in Kolonnenapparaten in Benzol, Toluol und Xylol getrennt. Aus den alkalischen Waschlaugen wird Phenol gewonnen, aus der sauren Waschflüssigkeit Pyridin und seine Homologen. Das Benzol ist stets durch Thiophen verunreinigt, in dem Xylol sind die drei Isomeren enthalten, vorwiegend m-Xylol. Das Mittelöl enthält etwa 40% Naphthalin und ist infolgedessen breiförmig; das Naphthalin wird durch Abpressen daraus gewonnen. Die dabei erhaltenen flüssigen Anteile enthalten ebenfalls Phenol und Kresole in ziemlicher Menge, daneben Trimethylbenzole, Cumaron, Inden u. a. Das Schweröl enthält auch noch beträchtliche Mengen von Naphthalin, daneben Methylnaphthalin, Acenaphthen, Diphenyl und andere feste Kohlenwasserstoffe, von sauren Bestandteilen Phenole und Naphthole und von basischen Stoffen Chinolin und Isochinolin. Das Anthrazenöl enthält neben Anthrazen Carbazol, Phenanthren, Fluoren, Chrysen u. a. zum Teil noch unbekannte Verbindungen. Das Pech schließlich, das 50 bis 60% des Teers ausmacht, besteht aus zahlreichen hochmolekularen bituminösen Verbindungen von unbekannter Zusammensetzung und aus mehr oder weniger freiem Kohlenstoff.

Die Verwendung der Teerprodukte ist eine so außerordentlich umfangreiche und

vielseitige, daß hier nur das allerwichtigste genannt werden kann. Bekanntlich bilden die Teerprodukte nicht nur die Grundlage unserer hochentwickelten Farbstoffindustrie, sondern es werden auch zahlreiche Arzneimittel, Riechstoffe, Desinfektionsmittel, photographische Präparate, Sprengstoffe u. a. technisch wichtige Stoffe aus dem Teer gewonnen. Aus Benzol wird Nitrobenzol und Anilin hergestellt, aus Toluol das Trinitrotoluol, die Toluidine und das als künstlicher Süßstoff bekannte Saccharin, aus Phenol die Pikrinsäure, die Salizylsäure sowie das Amidophenol, ferner aus Naphthalin die für die Indigofabrikation wichtige Phthalsäure, aus dem Anthrazen das Alizarin usw. Neben diesen chemischen Verwendungsarten müssen auch die Verwendung des Benzols und der schweren Teeröle als Motorenbrennstoff sowie zu Feuerungszwecken genannt werden. Die schweren Teeröle dienen in noch größerem Umfang zur Imprägnierung von Holz (Eisenbahnschwellen), das Pech wird zum Brikettieren von Feinkohle verwendet, in Benzol bezw. schwereren Teerölen gelöst dient es als Eisenlack und Dachlack.

Literatur. **W. Harper**, *Die Destillation industrieller und forstwirtschaftlicher Holzabfälle. Berlin 1907.* — **M. Klar**, *Technologie der Holzverkohlung. 2. Aufl. Berlin 1910.* — **P. Klason, G. v. Heidenstam und E. Norlin**, *Untersuchungen zur Holzverkohlung. Zeitschr. f. angew. Chemie 1910, S. 1252.* — **R. O. Herzog**, *Chemische Technologie der organischen Verbindungen. Heidelberg 1912.* — **J. Bersch**, *Die Verwertung des Holzes auf chemischem Wege. 3. Aufl. Wien 1912.* — **R. Löbel**, *Beiträge zur Kenntnis des Torfteers (Diss.). Hannover 1911.* — **W. Scheithauer**, *Die Braunkohlenteerprodukte und das Oelgas. Hannover 1907.* — **Derselbe**, *Die Schwelteere, ihre Gewinnung und Verarbeitung. Leipzig 1911.* — **E. Graefe**, *Die Braunkohlenteer-Industrie. Halle 1906.* — **G. Schultz**, *Chemie des Steinkohlenteers. 3. Aufl. Braunschweig 1900.* — **G. Kraemer und A. Spilker**, *Teer (in Muspratts „Technische Chemie“. 8. Bd., IV. Aufl. Braunschweig 1905).* — **A. Spilker**, *Kokerei und Teerprodukte der Steinkohle. Halle 1908.* — **G. Lunge und H. Köhler**, *Die Industrie des Steinkohlenteers und des Ammoniaks. 1. Bd. Braunschweig 1912.* — **L. Schmitz**, *Die flüssigen Brennstoffe. Berlin 1912.*

A. Sander.

Tektonik.

Vgl. den Artikel „Schichtenbau“.

Telegraphie.

A. Eigenarten des Telegraphen- und Fernsprechbetriebs. B. Telegraphentechnik. 1. Sender: a) Stromquellen. b) Sendeapparate. 2. Empfänger: a) Relais. b) Telegraphenapparate. α) Schreibtelegraphen. β) Drucktelegraphen. γ) Kopiertelegraphen. 3. Schaltungen: a) Erdrückleitung. b) Einfach- und Doppelstrom. α) Einfachstrom ohne Uebertragung. β) Uebertragung für Einfachstrom. γ) Doppelstrom. c) Mehrfachtelegraphie. α) Wechselzeitige. β) Gleichzeitige. γ) Gleichzeitige Telegraphie und Telephonie. d) Hilfschaltungen. e) Betrieb von Seekabeln. f) Leitungen. α) Oberirdische Leitungen. β) Kabel. αα) Seekabel. ββ) Erdkabel. C. Theorie der Fortpflanzung telegraphischer Zeichen.

A. Eigenarten des Telegraphen- und des Fernsprechbetriebs.

Obwohl Telegraphie und Telephonie der Regel nach beide zur Uebertragung von Nachrichten von einer sendenden Person an einen einzelnen Empfänger oder einen beschränkten Kreis von Empfängern dienen, so hat es sich doch durch die Entwickelung herausgebildet, daß durch den Telegraphen der Regel nach eine von dem Absender vorher schriftlich festgelegte Nachricht übermittelt wird, mit deren Aushändigung an den Empfänger die Uebermittelung beendet ist. Am Fernsprecher dagegen werden zwei Personen in unmittelbare mündliche Verständigung gebracht, die in Rede und Gegenrede ihre Gedanken austauschen.

Da beim Telegraphieren keine unmittelbare Gegenäußerung beabsichtigt ist, braucht das sendende Amt mit dem empfangenden nicht durch eine unmittelbare, durchgehende Leitung verbunden zu werden. Deshalb werden die Telegramme über große Entfernungen mittelbar befördert, indem nur größere Verkehrszentren untereinander durch direkte Leitungen verbunden werden; diese haben dann nicht nur den Verkehr zwischen den durch die Leitung verbundenen Städten, sondern auch den Verkehr zwischen den Orten der beiderseitigen Bezirke aufzunehmen. Solche Leitungen ermöglichen und erfordern daher die Aufstellung von schnell arbeitenden Telegraphensystemen. Die mittelgroßen Orte eines Bezirks haben in der Regel zunächst eine Verbindung mit dem Verkehrsmittelpunkt. Nach dem älteren Verfahren richteten sie zunächst alle Telegramme an den Mittelpunkt, wo sie aufgeschrieben und als „Durchgangstelegramme“ auf der zugehörigen Leitung an die Bestimmungsstation weitergegeben wurden. Nach einem neueren, mehr und mehr sich einbürgernden Verfahren werden in dem Verkehrsmittelpunkt die in den Bezirk führenden Leitungen zum Zweck des Telegraphierens vorübergehend verbunden, so daß also die Senderstelle unmittelbar mit der Empfangsstelle arbeitet. Das flache Land würde auch diese Einrichtungen nicht ausnutzen können. Ihm wird durch sogenannte Omnibusleitungen oder durch Fernsprechanschlüsse die Verbindung mit dem großen Telegraphennetz vermittelt.

Fern- und Nahverkehr erfolgen daher beim Telegraphen mit sehr verschiedenen Apparatsystemen; beim Fernsprecher sind diese und die Art des Nachrichtenaustausches in beiden Fällen gleich. Hier handelt es sich aber darum, zwei Teilnehmer in unmittelbare Verbindung zu bringen, und dies erfordert im Interesse einer wirtschaftlichen Ausnutzung der Leitungen die Anwendung von Umschalteinrichtungen, die den Austausch von Verbindungen zwischen großen Sätzen gleichartiger Teilnehmeranschlüsse ermöglichen.

Die Telegraphentechnik im engeren Sinne ist daher in erster Linie Technik der Telegraphenapparate, während die Leitungsumschalter nur eine geringe Rolle spielen; in der Fernsprechtechnik handelt es sich dagegen hauptsächlich um die Umschalteinrichtungen, während die Fernsprechapparate selbst mit wenigen Worten beschrieben sind.

B. Telegraphentechnik.

Ein Telegraphensystem umfaßt die drei Hauptteile **Sender**, **Leitung**, **Empfänger**. Da die Leitung davon weitaus das kostspieligste ist, so sind wohl ausnahmslos an jedem ihrer Enden sowohl Sendeapparate, als Empfangsapparate aufgestellt. Mittels einer dem besonderen Zweck angepaßten Schaltung, wie solche später besprochen werden, wird es ermöglicht, auf jeder Seite entweder gleichzeitig oder abwechselnd zu senden und zu empfangen; grundsätzlich braucht aber zunächst nur der einseitige Verkehr erörtert zu werden.

1. Der Sender. Der **Sender** besteht aus einer Stromquelle und einer Vorrichtung, um die Stromquelle mit der Leitung zu verbinden oder von ihr zu trennen.

1a) **Stromquellen.** Als Stromquellen werden in einfacheren Verhältnissen noch jetzt Primärelemente des Danielltyps angewandt, die sich durch geringe Ansprüche an Wartung und sparsamen Verbrauch auszeichnen. Da sie einen erheblichen inneren Widerstand haben, etwa 5 Ohm bei 1 Volt elektromotorischer Kraft, mußte man bei Leitungen und Schaltungen, die großen Stromverbrauch haben (Kabel- und Mehrfachbetrieb) die Batterien aus zahlreichen parallelgeschalteten Reihen zusammensetzen, wodurch die Zahl der Zellen in Aemtern wie dem Berliner Haupttelegraphenamt auf über 10000 stieg. In Deutschland hat man seit 1890 die Primärelemente auf Aemtern von Bedeutung nach und nach durch Bleisammler ersetzt, deren kleiner innerer Widerstand es auch bei mäßigen Typen ermöglicht, alle Leitungen eines Amtes aus verschiedenen Stufen einer und derselben Sammlerbatterie zu speisen. In großen amerikanischen Aemtern verwendet man schon lange Motorumformer, deren Motoren aus dem örtlichen Licht- oder Kraftnetz gespeist werden, während die einzeln angetriebenen Gleichstromgeneratoren so in Reihe geschaltet sind, daß die erforderlichen Spannungsstufen gebildet werden.

In einzelnen Telegraphensystemen (**Rowland**, **Crehore und Squier**), die aber nicht festen Fuß haben fassen können, werden Wechselströme entsendet, indem von einem andauernden Wechselstrom bestimmte Halbperioden allein zur Leitung zugelassen werden, während andere unterdrückt werden.

1b) **Sendeapparate.** Die Sendeapparate kommen im Prinzip auf die **Handtaste** (Fig. 1) hinaus.

Sie ist ein Zweiwegeschalter, dem durch eine am Gestell befestigte Feder eine natürliche Ruhelage gegeben wird, bei welcher eine mit dem Körper verbundene Zuleitung mit dem Ruhekontakt a verbunden wird, während sie in der Arbeitslage der Taste mit dem Arbeitskontakt b in Verbindung gesetzt wird. Durch wechselndes Niederdrücken und Loslassen der Taste kann man zwei durch die wirksame Spannung unterschiedene Zustände in der Leitung hervorbringen.

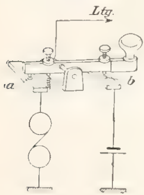


Fig. 1. Handtaste.

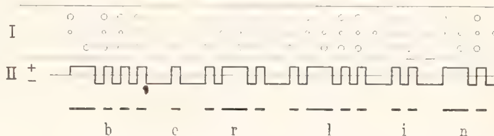


Fig. 2. Lochstreifen und Stromgebung beim Wheatstone-Telegraphen.

Bei einigen Systemen wird nur einer der beiden Kontakte a und b in Verbindung mit dem Körper gebraucht, die Taste dient dann nur als einfacher Stromschließer oder Oeffner.

Die mit der Taste erreichbare Telegraphiergeschwindigkeit ist an die Leistungsfähigkeit der Hand gebunden. Sowohl wenn man im Empfänger die Zeichen mit dem Gehör aufnimmt, als bei den Schnelltelegraphen können viel mehr Stromimpulse aufgenommen werden, als man mit der Hand senden kann. Zur Beschleunigung dienen dann entweder Sender mit Klaviatur oder Maschinensender. Die **Sender mit Klaviatur** haben das Aussehen einer Schreibmaschine. Jedem Zeichen gehört eine Taste zu. Drückt man diese nieder, so gibt ein durch äußere Kraft getriebenes Organ mittels einer Schaltwalze mit Daumen die zu dem betreffenden Zeichen gehörenden Stromstöße in der richtigen Folge und Zeitdauer ab.

In den **Maschinensendern** wird die Stromgebung mittels eines vorher gelochten, die Nachricht enthaltenden Streifens ausgeführt.

Der verbreitetste ist der von Wheatstone. Der Streifen wird auf einem Stanzapparat hergestellt, dessen drei Stempel die Lochungen für einen Strich, einen Punkt oder einen Zwischenraum mit je einem Schlage erzeugen. Figur 2 zeigt in I einen solchen Streifen, in II die zugehörige Stromgebung und die Bedeutung der Lochungen. Die mittlere Lochreihe dient zur Führung, ihre Löcher werden bei jedem Zeichen in entsprechender Zahl geschlagen. Beim Durchlaufen durch die Sendemaschine geht der Streifen vor den Köpfen zweier Stempel vorüber, die das Bestreben haben, durch das Papier vorzudringen. Trifft der zur oberen Reihe gehörende Stempel auf ein Loch, so legt ein damit zusammenhängendes Hebelwerk einen der Handtaste entsprechenden Hebel auf die eine Seite, während nach dem Durchgange des zur unteren Reihe gehörenden Stempels der Hebel auf die andere Seite gelegt wird. So wird der Kontakthebel für einen Punkt nur während einer Zeiteinheit, für einen Strich während dreier Zeiteinheiten aus der Ruhelage entfernt, während er zwischen aufeinander folgenden Punkten oder Strichen für eine Zeiteinheit in die Ruhelage zurückkehrt. Auf diese Weise werden gleiche Impulse, wie bei der Abgabe der Morsezeichen entsandt. Man kann natürlich auch den Streifen direkt zur Sendung benutzen, indem man oberhalb und unterhalb Kontaktelektroden, z. B. Bürsten laufen läßt, die bei den Löchern sich metallisch berühren (Delany, Pollak-Virag).

Nach der Art des Wheatstonesenders sind andere Maschinensender gebaut, die z. B. für Punkte und Striche gleich lange aber entgegengesetzte Stromstöße senden oder die Gegenstromsender (curb-sender) für Seekabelbetrieb, bei denen unmittelbar hinter jedem Zeichen ein schwächeres entgegengesetzter Richtung gegeben wird.

Zur Beschleunigung der Herstellung des gelochten Streifens werden neuerdings Vorrichtungen in Form einer Schreibmaschine hergestellt, bei denen durch den Druck auf irgendeine Taste unter Auslösung eines pneumatischen oder motorischen Antriebs die Lochung für den ganzen Buchstaben mit einem Male hergestellt wird.

Drucktelegraphen mit Klaviatur wie Hughes, Baudot haben Sendevorrichtungen besonderer Form, deren Beschreibung hier zu weit führen würde.

2. Empfänger. Deren Formen sind bei weitem mannigfaltiger, als die der Sender. Indessen treten nur bei den einfacheren Systemen die Linienströme unmittelbar in den Elektromagnet des Empfängers ein; in den schwierigeren wirken sie zunächst auf einen vorläufigen Empfänger einfachster Art, den man Relais nennt.

2a) **Relais.** Die Relais gehören daher zu den wichtigsten telegraphischen Apparaten. Durch die von den Linienströmen gesteuerten Hin- und Herbewegungen des Relaisankers löst man eine Kraftquelle am Orte des Empfängers aus, die dann die Arbeit zur Bildung des Zeichens hergibt. In der Regel schließt der leichte Anker des Linienrelais Stromkreise für Elektromagnete, die in Ortskreisen mit kräftigen Stromquellen liegen, und diese verrichten die erforderliche Arbeit.

In den selbsttätigen Uebertragungen werden die Relais benutzt, um an Unterwegsorten zwischen Sender und Empfänger mittels der ankommenden schwachen Ströme und der neuen Kraftquelle der Uebertragungsbatterie neue Zeichen zu bilden, also die Tätigkeit des Senders an einem gegen den Empfänger vorgeschobenen Ort selbsttätig zu wiederholen.

Ein Relais ist ein Elektromagnet, der einen dem Zweck entsprechend leichten Anker hin- und herbewegt. Bei einigen Relais wird dem Anker durch den Zug einer Feder eine natürliche Ruhelage gegeben. Der Anker, an dessen Körper eine Zuleitung führt, legt sich je nachdem an den einen oder den anderen von zwei Kontakten, die man auch als Ruhe- und Arbeitskontakt bezeichnet, und führt also beim Hin- und Hergehen dieselbe Tätigkeit aus, wie die Handtaste.

Bei den meisten Relais sind die Anschlagkontakte einstellbar, sowohl einzeln durch Drehung der Schraubenspindeln, mittels deren sie in den Anschlagsäulen sitzen, als auch zusammen, indem die beiden Anschlagsäulen auf einem gemeinsamen Schlitten befestigt sind, der durch eine Stellschraube verstellt werden kann; man kann so, nachdem durch die Einzeleinstellung der Schrauben dem Anker eine gewisse Hubhöhe gegeben worden ist, ihm durch die gemeinsame Verstellung des Schlittens eine bestimmte Lage im Felde zwischen den Polschuhen des Elektromagnets geben.

Man unterscheidet neutrale und polarisierte Relais. Die ersteren enthalten nur einen Elektromagnet, die anderen einen Dauermagnet in Verbindung mit einem Elektromagnet.

Bei neutralen Relais schließt der Anker den Kreis der Induktionslinien im Elektromagnet. Da wegen der Bewegung die Luftzwischenräume im Vergleich zur äquivalenten Länge der Wege im Eisen sehr groß sind, so ist die Dichte des magnetischen Feldes im Luftraum nahezu proportional der Stromstärke und nahezu umgekehrt proportional der Länge des Luftspaltes. Die Kraft, mit der der Anker aus der Ruhelage gegen die Kraft einer ihn zurückhaltenden Feder angezogen wird, ist daher ungefähr dem Quadrat des Stromes proportional. Daraus folgt, daß das neutrale Relais sich wenig für den Nachweis solcher Ströme eignet, die verhältnismäßig langsam ansteigen, d. h. die Ströme am Ende langer Leitungen. Seine wesentliche Bedeutung hat das neutrale Relais in Ortskreisen, deren Strom schnell ansteigt und von äußeren Einflüssen unabhängig ist. In solchen Kreisen

arbeitet es am schnellsten und sichersten, wenn man den Luftzwischenraum und die Hubhöhe der Kontakte möglichst klein macht und die Feder so stark anspannt, wie es für die gegebene Stromstärke eben möglich ist, weil dabei die größten beschleunigenden Kräfte wirksam werden.

Das polarisierte Relais ist meist so eingerichtet, daß der die Leitungsspulen tragende Hufeisenelektromagnet mit dem Joch auf dem einen Pol des Dauermagnets sitzt, während der zwischen den Polschuhen des Hufeisens spielende Anker dem zweiten Pol des Dauermagnets gegenübersteht. So wird z. B. der Anker nordmagnetisch, während beide Polschuhe südmagnetisch sind. Das Prinzip ist in Fig. 3 wiedergegeben. Der Anker wird sich gegen einen der Kontaktstifte anlegen, mit einer Kraft, die der Differenz der Zugkräfte der beiden Pole gleich ist. Sendet der Dauermagnet durch die beiden Kreise die Flüsse Φ_1 und Φ_2, während der Elektromagnet den Fluß Φ erzeugt, so ist die Zugkraft proportional $(\Phi_2+\Phi)^2-(\Phi_1-\Phi)^2-(\Phi_2^2-\Phi_1^2)+2\Phi(\Phi_1+\Phi_2)$.

Der Fluß Φ ist der Stromstärke proportional, da der Luftweg, welcher den Eisenweg an magnetischem Widerstand erheblich übertrifft, sich bei der Bewegung des Ankers im ganzen nicht ändert. Die Aenderung des Kontaktdrucks durch Φ ist also einerseits der Stromstärke, andererseits dem Dauermagnetismus proportional. Für kleine Stromstärken wird daher bei starkem Dauermagnetismus bereits eine große Kraftwirkung erzeugt, und deshalb eignet sich das polarisierte Relais besser als das neutrale zum Nachweis langsam ansteigender Ströme.

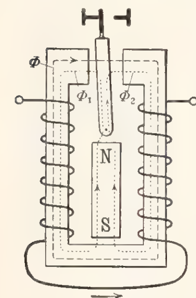


Fig. 3. Polarisiertes Relais.

Man kann das Relais so einstellen, daß es ohne Strom stets einen bestimmten Kontakt aufsucht, und den anderen als Arbeitskontakt verwendet. Die Bewegung des Relais geschieht dann durch aufeinander folgende Ströme gleicher Richtung (Einfachstrom). Diese Betriebsart beruht auf dem Zusammenwirken der unveränderlichen, zum Ruhekontakt treibenden Zugkraft des Dauermagnets mit der nach den Leitungsverhältnissen veränderlichen Zugkraft des Elektromagnets; sie ist also von Witterungseinflüssen abhängig. Besser ist die Einstellung für Doppelstrombetrieb. Der die Anschlagkontakte tragende Schlitten wird so eingestellt, daß die Ankerzunge jeweils an dem Anschlag liegen bleibt, auf den sie durch irgendeinen Eingriff gelegt wird (indifferent); die Hubhöhe des Ankers zwischen den Kontakten wird möglichst klein eingestellt. Man bewegt dann das Relais durch Ströme wechselnder Richtung. Durch die Einstellung in die indifferente Zone macht man Φ_1 nahezu gleich Φ_2, die Empfindlichkeit ist dann außerordentlich groß, so daß bei einem guten Relais ein kleiner Teil des betriebsmäßigen Stromes schon zur Wirkung ausreicht; der Anker liegt also an beiden Kontakten mit genügend großem Druck an. Es versteht sich von selbst, daß man die Lagerreibung möglichst klein macht und dem Anker ein geringes Trägheitsmoment gibt.

2b) Telegraphenapparate. Man unterscheidet solche Apparate, deren Zeichen nach einem besonderen, verabredeten System gebildet sind, solche, die das Telegramm in gewöhnlicher Druckschrift wiedergeben und endlich solche, bei denen im Empfänger eine möglichst genaue Kopie des abgegebenen Telegramms entsteht. Man nennt sie der Reihe nach auch Schreib-, Druck- und Kopiertelegraphen.

a) Die Schreibtelegraphen gründen sich auf die Erfindung Morses (1832), auf einem bewegten Papierstreifen lange und kurze Stromimpulse durch einen quer zur Bewegungsrichtung arbeitenden Stift aufzuzeichnen. Statt der dadurch entstehenden Zickzacklinie benutzte man später (1846) einen Apparat, der in der Bewegungsrichtung kurze und lange Striche schrieb. Bei dieser Form ist das System geblieben. Anfangs geschah dies durch Eindrücken des Stifts in das Papier, später durch ein mit einem Teil seines Umfanges in der Schreibfarbe laufendes, durch den Elektromagnet gegen das Papier bewegtes und vom Laufwerk gedrehtes Farbrädchen. Eine besonders leichte Ausführung des Rädchens, verbunden mit einem polarisierten, schnell arbeitenden Magnet zeigt der Empfänger des Wheastoneschen Schnelltelegraphen.

Auf die ältere Art der Aufzeichnung durch eine Zickzack- oder Wellenlinie sind die Empfänger für Kabeltelegraphie zurückgegangen. Damit ein Elektromagnet aufeinanderfolgende Zeichen einzeln verzeichnen kann, muß die Stromstärke zwischen beiden mindestens so tief fallen, daß der Anker losgelassen wird. Bei Kabeln überlagern sich die Zeichen sehr; zum Lesen der Signale ist es nur nötig, zu erkennen, wie oft ein neues Zeichen begonnen hat, auch wenn das alte noch nicht ganz vorüber war. Die Kabelempfänger schreiben also die Stromstärke als Zeitfunktion auf. Der empfindlichste ist der Heberschreiber (siphon-recorder) von Sir William Thomson (Lord Kelvin), nach dessen Prinzip auch die Drehspulengalvanometer gebaut sind.

Im Feld eines Dauermagnets ist eine Spule bifilar aufgehängt, die durch Seidenfäden ihre Bewegung auf einen feinen Glasheber überträgt, der mit dem kurzen Schenkel in die Schreibflüssigkeit taucht, während der lange so gebogen ist, daß er senkrecht zur Papierfläche schreibt. Zur Vermeidung der Reibung wird der Heber durch einen Hilfmagnet in Erschütterungen versetzt, so daß er tatsächlich statt einer Linie eine

Folge von feinen Punkten (gegen 200 in der Sekunde) aufschreibt, vgl. Fig. 20, bei der eine Abweichung nach oben einem Punkt, eine nach unten einem Strich des Morsealphabets entspricht.

Zur Aufnahme von Zeichen auf kürzeren Seekabeln dient der Undulator von Lauritzen der Großen Nordischen Telegraphen-Gesellschaft, bei dem ein von einer Spiralfeder in der Anfangslage gehaltener polarisierter Anker durch einen Elektromagnet ungefähr proportional der Stromstärke gedreht wird. Ein an der Achse des Ankers befestigtes Heberröhrchen zeichnet die Bewegungen auf.

Klopfer. Der Anker des Morseelektromagnets hat beim Anziehen die Schreibvorrichtung gegen das Papier zu bewegen, während er beim Loslassen leer gegen einen Anschlag geht. Dies gibt zwei verschiedene Klänge, und mit einiger Erfahrung kann man die kurzen und langen Stromsendungen abhören, ohne sie von dem Streifen abzulesen. Nachdem man die darin liegende Zeitersparnis erkannt hatte, ließ man die Schreibvorrichtung überhaupt weg und konstruierte die Anschläge so, daß der Klang möglichst verschieden ausfällt. So entstand der Klopfer, mit dem hauptsächlich in den englisch sprechenden Ländern der größte Teil des Verkehrs abgewickelt wird. Die unmittelbare Wiedergabe durch die Schreibmaschine ersetzt dort den in anderen Ländern vorzugsweise üblichen Betrieb mit Drucktelegraphen. Gleichfalls für Aufnahme mit dem Gehör bestimmt ist der Telegraph von Mercadier-Magunna, der später erwähnt werden wird.

β) Die Drucktelegraphen sind aus den vor der Einführung des Morsesystems in Europa gebräuchlichen Zeigertelegraphen hervorgegangen. Die Einzelheiten dieser Zeigertelegraphen (Wheatstone, Breguet, Siemens) haben nur historisches Interesse. Das Prinzip des alten Siemensschen Zeigertelegraphen ist auf den modernen Ferndrucker von Siemens und Halske übergegangen, der zur Verbindung von Privaten und von Stadtämtern mit den Telegraphenämtern benutzt wird.

Im Sender und Empfänger schaltet (mittels Linienrelais) je ein Elektromagnet ein Schaltrad durch Selbstunterbrechung so lange fort, bis das Schaltrad im Sender durch eine niedergedrückte Taste aufgehalten wird. Dann bleibt also auch der Empfänger stehen, und ein im Vergleich zum Schaltmagnet langsam wirkender Druckmagnet hat Zeit, den der niedergedrückten Taste des Senders entsprechenden Buchstaben auf dem Typenrad des Empfängers auf das Papier zu drucken.

Der Drucktelegraph von Hughes, der im Großbetrieb der Telegraphie in Europa vorherrscht, verwendet auch gleichlaufende, aber voneinander freie Mechanismen.

Zwei Laufwerke werden durch Pendelregulatoren auf möglichst gleicher Geschwindigkeit gehalten. Mit ihnen bewegen sich die Typenräder, und da beide Werke zu Anfang aus derselben Grundstellung ausgelöst werden, so nehmen beim Sender und Empfänger im gleichen Augenblick dieselben Buchstaben dieselbe Stellung ein. Mit der Achse des Typenrads ist eine Sendevorrichtung zwangläufig gekuppelt, die durch einen mittels einer Klaviatur emporgehobenen Stift in demselben Augenblick einen Strom in die Leitung sendet, in dem der zur Taste gehörende Buchstabe des Typenrades der Druckvorrichtung gegenüber steht. Dieser Strom löst im Sender und im Empfänger eine Koppelung aus, durch welche die Druckvorrichtung für einen Umgang mit dem Laufwerk gekuppelt wird, um den Buchstaben abzudrucken. Die Typenräder bleiben dabei im Lauf, der Druck erfolgt „fliegend“ wie z. B. auch der Papierstreifen sich über den zu druckenden Buchstaben abrollt. Einer der zahlreichen Daumen der Druckachse dient noch dazu, das Typenrad mittels einer Reibungskuppelung bei beiden Apparaten genau einzustellen, falls der Gleichlauf nicht mehr ganz vollkommen war.

Französischen Ursprungs und im Verkehr mit Frankreich viel gebraucht ist der Typendrucker von Baudot. Er ist zugleich zurzeit der Hauptvertreter der wechselzeitigen Mehrfachtelegraphie.

Die Verteiler sind in Sektoren eingeteilt, von denen jeder einem Satz Sender und Empfänger angehört. Der sendende Beamte hat eine kleine Klaviatur mit fünf Tasten, die je nach dem Zeichen gedrückt werden, und von denen jede ein positives oder negatives Zeichen entsendet.

Die positiven Stromstöße legen, wenn sie durch die fünf Sektorteile des Empfängers jeder zu seinem Elektromagneten gelangen, dessen Anker in eine Sperrlage um. Diese Anker werden dann von einem als Kombinator bezeichneten Teil des Triebwerks erfaßt und wählen eine bestimmte Stelle des Umfangs aus, bei welcher der Druck erfolgt.

Neuerdings haben Siemens und Halske einen Drucktelegraphen für hohe Leistungsfähigkeit (400 bis 700 Zeichen in der Minute) herausgebracht, bei dem auch von einem Maschinensender mittels eines gelochten Streifens Kombinationen von fünf positiven oder negativen Strömen entsandt werden.

Der mit dem Sender gleichlaufende Empfänger enthält eine Scheibe mit feststehenden geteilten Kontaktringen und umlaufenden Bürsten. Zwei Ringe und Bürsten dienen als Verteiler und stellen der Reihe nach die fünf indifferenten Empfangsrelais nach den Stromsendungen des Senders. Es sind aber zwei Sätze von je fünf Relais vorhanden, die durch einen mit der halben Geschwindigkeit des Bürstensatzes umlaufenden Umschalter abwechselnd an den Verteiler angelegt werden. Nachdem die Relais während eines Umgangs gestellt worden sind, wird bei der nächsten Umschaltung ein Stromkreis hergestellt, der über die Anker und Kontakte der Relais und über die außer den Verteilerringen noch vorhandenen Kontaktringe und Bürsten-

sätze der Scheibe geht und den Druckelektromagnet enthält. Von diesen Ringen ist der erste in 2, der zweite in 2^2, usw., der fünfte in 2^5 Teile geteilt, und die Verbindungen der Bürsten und Kontaktsegmente untereinander sind derartig, daß jeder der $2^5 = 32$ möglichen Kombinationen der Stellungen der fünf Relaisanker nur eine einzige Stellung des Bürstensatzes entspricht, bei der der Kreis des Druckelektromagnets geschlossen wird. Dadurch wird also auch der Druck eines bestimmten Buchstabens oder Zeichens bewirkt. Nach Vollendung des Umgangs kommt der inzwischen über den Verteiler eingestellte zweite Relaissatz an den Druckkreis, so daß immer gleichzeitig ein Zeichen gewählt und das vorhergehende gedruckt wird. Die Elektromagnete dieses Telegraphen werden über Kondensatoren erregt, um eine möglichst kurz dauernde, aber energische Kraftwirkung zu erzielen.

Außer den erwähnten Systemen der Drucktelegraphen gibt es noch andere, die einen gelochten Streifen als Sender benutzen, im Empfänger einen gleichartigen Streifen erzeugen, und diesen in einer gewöhnlichen Schreibmaschine in Druckschrift übersetzen. Dies sind die Telegraphen von Murray und von Creed. Murray sendet für jedes Zeichen fünf Stromstöße bestimmter Polarität, während Creed sich des gewöhnlichen Wheatstonestreifens bedient. Die Uebersetzer arbeiten nach demselben Prinzip wie die Jacquardwebstühle. Gegen den Lochstreifen legt sich mit den Köpfen eine Anzahl von Schienen, die auf der Langseite bestimmte Einkerbungen tragen. Je nachdem, welche Schienen durch Löcher vordringen können und welche durch das Papier gehalten werden, kommen bestimmte Kerben in eine Reihe zu liegen, so daß der Hebel eines bestimmten Buchstabens einfallen kann.

γ) Kopiertelegraphen. Man unterscheidet zwei Gruppen. Die Apparate der ersten lassen den Schreibstift des Empfängers gleichzeitig mit dem des Senders dieselben Linienzüge ausführen. Die Bewegungen werden in zwei aufeinander senkrechte Komponenten zerlegt oder aus ihnen zusammengesetzt; zur Uebertragung bedient man sich entweder der Fortschaltung (Cerebotani), indem jede Komponente ein Unterbrecherrad antreibt, das eine dem Wege proportionale Zahl von Stromstößen aussendet, oder der Widerstandsänderung (Gruhn, Ritchie). Nach dem System Ritchie ist eine im Haupttelegraphenamt in London zentralisierte Anlage im Betrieb. Die zweite Gruppe umfaßt Apparate, die von einem fertigen Bilde eine Kopie ausführen, indem sie das Bild durch den Sender in eng nebeneinander liegenden parallelen Linien absuchen, und die Stellen, wo die Sucherlinie etwa Schriftzeichen trifft, im Empfänger registrieren. Das primäre Bild ist mit leitender Tinte gezeichnet (Caselli) oder auf leitender Fläche mit nichtleitender Tinte (Korn), oder reliefartig gemacht (Belin, Carbonnelle) oder auf ein klares Filmblatt kopiert (Korn).

Der letztere Apparat von Korn, der bei Bildübertragungen z. B. zwischen Berlin und Paris vorzügliche Ergebnisse geliefert hat, bedient sich der Selenzellen. Das Bild wird um eine Trommel gelegt, innerhalb deren sich eine Lichtquelle befindet. Die Trommel rotiert, wie die Walze eines Phonographen, so daß jede Stelle an einem Fenster in einer festen Wand vorbeikommt, hinter der eine Selenzelle liegt. Diese wird je nach der Tönung der Stelle verschieden erregt. Im Empfänger wird eine Trommel mit lichtempfindlichem Papier von Umdrehung zu Umdrehung in Gleichlauf mit der des Senders erhalten; eine je nach der Stromstärke verschieden stark lichtdurchlässige Blende regelt die Belichtung des Empfängers in jedem Augenblick.

3. Schaltungen. Stromquelle, Sender, Leitung und Empfänger bilden insgesamt eine Schaltung. Da die komplizierten Systeme in der Regel mit Linienrelais arbeiten, so unterscheiden sich ihre Schaltungen, von den Ortskreisen abgesehen, nicht wesentlich von den für einfache Systeme gebräuchlichen. Wir wollen daher im Sender nur eine Vorrichtung, um den Strom zu schließen und zu öffnen, annehmen, im Empfänger nur ein Relais.

Wir teilen die Schaltungen nach folgenden Gesichtspunkten:

1. Mit Bezug auf die Stromgebung in solche
   a) für Einfachstrom,
   b) für Doppelstrom.
2. Mit Bezug auf die räumliche Anordnung der Leitung in solche
   a) mit einer vom Sender zum Empfänger durchlaufenden Leitung,
   b) mit einer streckenweise unterteilten Leitung, deren Teile durch Uebertragungen verbunden sind.
3. Mit Bezug auf die zeitliche Ausnutzung der Leitung in solche,
   a) mit Einfachbetrieb, ein Sender und ein Empfänger,
   b) mit Mehrfachbetrieb, mehrere unabhängig arbeitende Sender und mehrere Empfänger.

Die gebräuchlichen Schaltungen haben je ein Merkmal aus jeder Hauptgruppe. In Anlehnung an die Praxis werden wir am besten nach den Unterabteilungen der ersten Gruppe teilen.

3a) Erdrückleitungen. Es ist noch zu erwähnen, daß die Telegraphenleitungen heute noch meist als Einzelleitungen mit Erdrückleitung (Steinheil 1838) betrieben werden. Ob dies in Zukunft ebenso allgemein der Fall sein kann, ist zweifelhaft wegen der sich immer mehr ausbreiten-

den elektrischen Bahnen. Diese senden starke Ströme durch die Erde, die teils durch Verzweigung, teils durch Induktion zwischen den durch die beiderseitigen metallischen Hin- und Erdrückleitungen gebildeten Schleifen in den Telegraphenleitungen störende Ströme erzeugen. Von Zeit zu Zeit treten auch starke Ströme tellurischen Ursprungs in den Leitungen auf, die das Arbeiten in Einzelleitung mit Erdrückleitung unmöglich machen; für diesen Fall sind im Betrieb besondere Schaltungen für vorübergehenden Gebrauch vorgesehen, bei denen je zwei sonst selbständige Leitungen zu einer Doppelleitung verbunden werden.

3b) Einfachstrom und Doppelstrom. Wird die Taste Fig. 1 durch Niederdrücken und Loslassen bewegt, so wird eine mit dem Körper verbundene Leitung bald mit dem Arbeitskontakt, bald mit dem Ruhekontakt verbunden. Wenn nur an einem dieser Kontakte eine Stromquelle liegt, so wird nur während der Berührung dieses Kontaktes ein Strom in die Leitung gesandt, während diese sich selbst überlassen ist, wenn der andere Kontakt berührt wird. Man spricht dann von Einfachstrom.

Man kann aber auch beide Kontakte a und b mit verschiedenen Stromquellen verbinden; dann spricht man von Doppelstrom. Da nach der Gewöhnung bei der Handhabung der Taste beim Niederdrücken die für das Zeichen erforderlichen Ströme entsandt werden, so nennt man die vom Arbeitskontakt ausgehenden Ströme die Zeichenströme und die beim Zurückgehen der Taste entsandten Ströme die Trennströme.

Wir besprechen einige typische Schaltungen.

α) Schaltungen für Einfachstrom ohne Uebertragung und für Einfachbetrieb. Man unterscheidet darin noch Schaltungen für Arbeitsstrom und für Ruhestrom, je nachdem der wirksame Leitungsstrom nur fließt, wenn beim Arbeiten die Taste gedrückt wird, oder aber wenn die Taste ihre Ruhelage einnimmt.

Fig. 4 stellt die in Deutschland gebräuchliche Schaltung für Arbeitsstrom dar. Am Arbeitskontakt jeder Taste liegt eine Batterie, am Ruhekontakt ein Relais oder auch der Empfänger (Klopfer, Farbschreiber) direkt. Der Apparat des fernen Amts ist in der Ruhelage zum Anruf bereit; während des Arbeitens kann das ferne Amt ein Zeichen zur Unterbrechung geben. Hat die Leitung Kapazität, so erhält der eigene Empfangsapparat Entladungsströme aus der Leitung (Rückschläge). Man kann diese unwirksam machen, indem man einen polarisierten Empfänger verwendet; damit dann beide Anstalten miteinander verkehren können, müssen die Stromquellen mit entgegengesetzten Polen an die Leitung geschaltet werden.

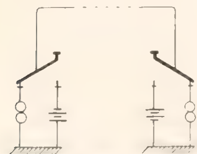
Für Leitungen mit geringem Verkehr, bei denen eine große Anzahl von Stationen in die Lage gesetzt werden sollen, untereinander beliebig in Verkehr zu treten (Omnibusleitungen), wendet man Ruhestromschaltungen an. Jede einzelne Station hat im Grundsatz Stromquelle, Taste und Empfänger, die nach Figur 5 alle mit den Leitungsstücken in Reihe geschaltet sind.

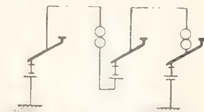
Drückt man irgendeine Taste nieder, so fallen die bis dahin festgehaltenen Anker aller Stationsapparate ab. Will eine Station ein Telegramm an irgendeine andere abgeben, so gibt sie ein verabredetes Rufzeichen, das bei allen anderen an der Bewegung der Anker zu hören ist; nur die gerufene Stelle beantwortet es. Dies System hat den Nachteil, daß man die Zeichen schlecht nach dem Gehör aufnehmen kann, weil Anschlag und Rückschlag des Ankers gegen die bei Arbeitsstrom übliche Weise vertauscht sind. Es wird daher nur mit Farbschreibern betrieben, die auch eine besondere Einrichtung des Schreibhebels erfordern.

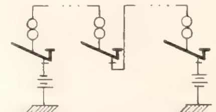
Um den Klopfer bei Omnibusleitungen verwenden zu können, verändert man die Schaltung in die als amerikanische Ruhestromschaltung bezeichnete. Jeder Apparatsatz erhält die Einrichtung nach Fig. 6. Jede Station kann jede andere anrufen und von jeder errufen werden; bei ruhendem Betrieb führt die Leitung einen Ruhestrom, während das Telegraphieren mittels Arbeitsstrom geschieht. Nach Schluß einer Sendung muß die Taste geschlossen werden, weil sonst die ganze Leitung brach liegt; es gibt daher zahlreiche Versuche, die Einrichtung zwangschlüssig zu machen.

Wir übergehen die zahlreichen, nur vom Standpunkt des Betriebs interessierenden Schaltungsarten, die zur Trennung der Leitung an Zwischenorten u. dgl. dienen.

β) Uebertragung für Einfachstrom. Wenn eine oberirdische Leitung eine gewisse Länge erreicht hat, so ist die Stromschwächung durch Ableitung so groß geworden, daß auch eine erhebliche Verstärkung der Batterie nicht imstande ist, eine zur Bewegung des Empfangsapparates aus-


Fig. 4. Schaltung für Arbeitsstrom.


Fig. 5. Ruhestromschaltung.


Fig. 6. Amerikanische Ruhestromschaltung.

reichende Stromstärke am Ende hervorzubringen. Außerdem machen sich bei langen Leitungen die verzögernden Eigenschaften bemerkbar, so daß die Kurve des empfangenen Stroms mehr und mehr zur Zeichenbildung ungeeignet wird. Diesen Mißständen begegnet man durch die Einrichtung von Uebertragungen, bei denen durch das empfangene Zeichen ein neues ausgelöst wird, die Leitung wird so in eine Anzahl kürzerer Teile zerlegt, auf denen die stromschwächenden und stromverzögernden Eigenschaften nur von geringer Bedeutung sind. Die Uebertragung muß in beiden Richtungen wirksam sein. Für Arbeitsstrom hat sie die in Figur 7 dargestellte Schaltung:

Wird z. B. ein Strom von der linken Seite her gesandt, so geht er über den Ankerhebel und Ruhekontakt des Relais R_2 und durch die Wickelung des Relais R_1; indem dieses seinen Anker anzieht, sendet es aus seiner Batterie einen Strom nach der rechten Seite der Leitung Das Umgekehrte vollzieht sich, wenn der Stromstoß von der rechten Seite herkommt.

γ) Schaltungen für Doppelstrom. Bei Einfachstrom tritt die Zeichenbildung im Empfangsapparat durch Zusammenwirken der vom Strom erzeugten Kräfte im Relais, die den Anker in die Arbeitslage bringen, mit den durch eine Feder oder durch Dauermagnete hervorgebrachten Kräften ein, die den Anker in die Ruhelage zurückführen. Jene Kräfte sind von wechselnden Zuständen auf der Leitung abhängig, diese nicht. Das Arbeiten des Relais bei Einfachstrom wird also durch Wechsel der elektrischen Eigenschaften der Leitung, z. B. infolge Nebel, Regen und dergleichen beeinträchtigt. Indem bei Doppelstrom beide Bewegungen des Relais unter der Wirkung von Strömen aus der Leitung ausgeführt werden, die beide durch die genannten Aenderungen in gleicher Weise betroffen werden, bleiben beide Wirkungen immer in demselben Verhältnis, und das Relais arbeitet, solange die Ströme überhaupt noch stark genug sind, es zu bewegen.

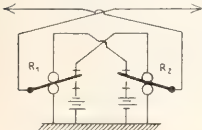


Fig. 7.

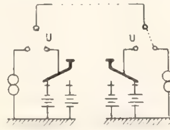


Fig. 8.

Fig. 7. Uebertragung für Einfachstrom.
Fig. 8. Schaltung für Doppelstrom.

Figur 8 stellt die Doppelstromschaltung für Einfachbetrieb dar. Sie unterscheidet sich von der Schaltung für Einfachstrom insbesondere durch die Anwendung eines Umschalters U an jeder der beiden Stellen, durch den entweder die Sende- oder die Empfangsstellung eingenommen wird. Stehen die Umschalter in der bezeichneten Lage, so kann nur die linke Seite senden, und da sie keinen Empfangsapparat eingeschaltet hat, kann sie von rechts her nicht unterbrochen werden, bis sie den Umschalter U nach links umlegt. Dieser Umstand ist ein Mangel der Doppelstromschaltung, dessen Bedeutung aber dadurch vermindert wird, daß man gleichzeitig in der Regel noch die Gegensprechschaltung anwendet.

Nach dem Prinzip der Schaltung in Figur 9 ist die Uebertragung für Doppelstrom eingerichtet.

Sie unterscheidet sich von derjenigen für Einfachstrom dadurch, daß sie noch Zusatzrelais enthält, die die Tätigkeit der Umschalter U in Figur 8 ausführen. Nehmen wir in Figur 9 links einen Doppelstromsender, rechts einen Empfänger an, so ist demnach das Relais Rn auf der rechten Seite dauernd stromlos, während das auf der linken von Strömen wechselnder Richtung durchflossen wird. Sollen die Anker beider Relais die Funktionen von U ausführen, so müssen die Relais zunächst neutral sein, damit sie auch bei wechselnden Strömen ihre Anker stets anziehen; ferner müssen die Relaisanker so träge sein, daß sie bei schneller Umkehr der Stromrichtungen ihre Kontakte nicht verlassen. Im angenommenen Falle, wenn von links gesendet wird, zieht also das Relais Rn auf der linken Seite seinen Anker an und legt so die nach rechts gehende Leitung an den Anker des Relais rp links. Damit die Stromwechsel übertragen werden, ist der Linienstrom außer über die Umschaltrelais Rn (Fig. 9) noch über polarisierte Relais rp zu führen, deren Ankerkörper an den Arbeitskontakten der Umschalterelais liegen, während die Zungen zwischen den beiden Batteriepolen im Takt der Ströme hin und hergehen.

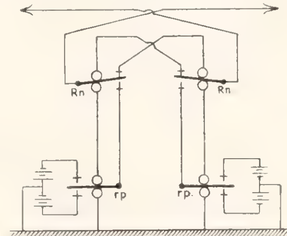


Fig. 9. Uebertragung für Doppelstrom.

3c) Mehrfachtelegraphie. Um eine Leitung dadurch besser auszunutzen, daß man auf ihr gleichzeitig mehrere unabhängige Telegramme befördern läßt, hat man zwei grundsätzlich verschiedene Arten von Schaltungen, die man als die gleichzeitige und die

wechselzeitige Mehrfachtelegraphie bezeichnet. Bei der gleichzeitigen steht die Leitung mit jedem der gleichzeitig angeschlossenen Apparatsysteme andauernd in Verbindung; es werden aber besondere Vorrichtungen angewandt, die die gegenseitige Beeinflussung nicht zueinander gehöriger Apparate verhindern. Bei der wechselzeitigen Mehrfachtelegraphie wird dagegen die Leitung der Reihe nach mit den einzelnen Apparatsystemen verbunden, so daß immer nur eins an der Leitung liegt, während die anderen abgeschaltet sind. Diese letztere Methode ist im Prinzip einfacher als die der gleichzeitigen Mehrfachtelegraphie, während umgekehrt die technischen Einrichtungen und die Betriebsweise bei der wechselzeitigen Mehrfachtelegraphie komplizierter sind, als bei den anderen Systemen.

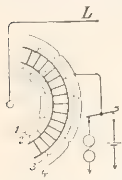


Fig. 10. Verteiler für Mehrfachtelegraphie.

a) Wechselzeitige Mehrfachtelegraphie. Um die Leitung in schneller Folge der Reihe nach mit den verschiedenen Apparatsystemen zu verbinden, braucht man einen Verteiler, der aus einem durch radiale Schnitte in einzelne Segmente geteilten Ring besteht (Fig. 10). Die Segmente sind voneinander isoliert.

In der Mitte des Rings dreht sich eine zu seiner Ebene senkrechte Achse mit einem Arm, der mit einer Kontaktfeder über die Segmente schleift. Dieser Arm steht mit der Leitung in Verbindung, während die verschiedenen Apparatsysteme an die Segmente angeschlossen sind. Je ein solcher Verteiler befindet sich auf jedem der beiden Aemter, und es muß durch besondere Regulierungsmittel und sogenannte Korrektionsströme dafür gesorgt werden, daß beide Verteiler gleiche Winkelgeschwindigkeit haben und auch gleichzeitig beide auf entsprechenden Segmenten stehen. Beim Baudotsystem wird beispielsweise jeder der angeschlossenen Apparatsätze während eines Viertels des Umlaufs mit der Leitung verbunden; während dieser Zeit werden die fünf für jedes Zeichen erforderlichen Stromkombinationen abgegeben. Ein Taktgeber sagt jedem der vier gleichzeitig arbeitenden Beamten, wann er an die Reihe ist. Für die Entsendung von Morsezeichen würde dies sich nicht eignen; man teilt dann die Scheibe in sehr viele Segmente (wie bei dem abgebildeten „Phonischen Rad") und weist sie jedem Teilnehmer zwar jedesmal nur eine kurze Zeit, aber mehrmals während jedes Umlaufs zu. Offenbar muß die Laufgeschwindigkeit in einem solchen Verhältnis zur Arbeitsgeschwindigkeit stehen, daß auch auf eine kurze Stromsendung noch mehrere Kontakte entfallen.

β) Gleichzeitige Mehrfachtelegraphie. Bei den Systemen der gleichzeitigen Mehrfachtelegraphie nennt man Gegensprechen (Duplex) das Verfahren, gleichzeitig von jedem Ende der Leitung aus, also in verschiedenen Richtungen eine unabhängige Nachricht zu geben, als Doppelsprechen (Diplex) bezeichnet man Verfahren, gleichzeitig in derselben Richtung zwei unabhängige Nachrichten zu geben, während man die Vereinigung beider als Doppelgegensprechen (Quadruplex) bezeichnet. Zu diesen Anordnungen gehören grundsätzlich auch die der gleichzeitigen Telegraphie und Telephonie, sowie das telephonische Mehrfachsprechen. Gegensprechschaltungen beruhen auf der Anwendung entweder des Prinzips der Wheastoneschen Brücke oder von Differentialrelais.

Fig. 11 stellt die Brückenschaltung für zwei Endämter dar. Durch ein in Reihe mit dem Relais

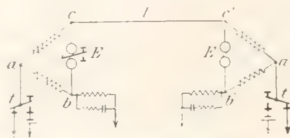
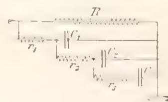


Fig. 11. Gegensprechen nach der Brückenschaltung.

E liegendes Galvanoskop gleicht man bei jedem der beiden Aemter eine sogenannte künstliche Leitung zwischen b, b¹ und der Erde so ab, daß sowohl bei Dauerstrom als bei aufeinanderfolgenden Zeichen kein merklicher Strom durch den eigenen Empfänger fließt. Während diese Abgleichung von der einen Seite geschieht, ruht natürlich die Taste auf der anderen Seite. Im Betriebe von Freileitungen und Landkabeln genügt mit Rücksicht auf die Betriebsart mit Relais die in Figur 12 dargestellte Form der künst-

Fig. 12. Künstliche Leitung für Mehrfachtelegraphie.



lichen Leitung. Der Widerstand R wird gleich dem Widerstand von Leitung und fernem Apparatsatz bei Dauerstrom gemacht, darauf werden die Kondensatoren C_1, C_2, C_3 und die Widerstände r_1, r_2, r_3 so abgeglichen, daß auch die Ausgleichströme nicht auf den eigenen Apparat wirken. Bei Freileitungen hat man in der Regel nur C_1 und r_1.

Senden beide Stationen gleichzeitig, so wird die Wheatstonesche Brückenanordnung als solche aufgehoben, so daß beide Relaisbrücken Strom, im wesentlichen aus der eigenen Batterie erhalten.

Die Brückensysteme haben den Nachteil, daß die Verzweigungswiderstände ab, ac große Spannungsverluste herbeiführen, da sie als Nebenschließungen zu den Relais

ziemlich große Werte (1000 Ohm) erhalten müssen. Sie wirken daher besonders bei Kabelleitungen verzögernd, da sie die Ladung des Kabels aufhalten.

Man verwendet deshalb im Betriebe der großen unterirdischen Telegraphenlinien im Deutschen Reiche zum Gegensprechen das System mit Differentialrelais.

R_1 und R_2 (Fig. 13) sind polarisierte Relais, jedes mit zwei Wickelungen, die so über die Schenkel des Elektromagnets verteilt sind, daß die magnetischen Wirkungen zweier gleicher Ströme, die aber in entgegengesetzter Richtung fließen, sich aufheben. L ist die wirkliche, L_1 und L_2 sind die künstlichen Leistungen. Die Abgleichung erfolgt mittels Einfachstroms mit Hilfe

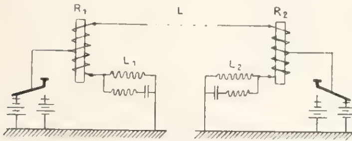


Fig. 13. Gegensprechen nach der Differentialschaltung.

eines nicht gezeichneten Differentialgalvanometers durch Veränderung der künstlichen Leitung.

Ebenso einfach stellt sich die Schaltung für eine Gegensprechübertragung mit Anwendung des Differentialrelais dar, Fig. 14.

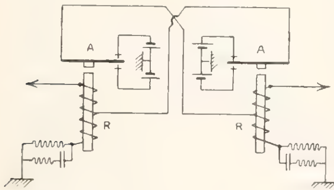


Fig. 14. Gegensprech-Uebertragung.

R, R sind die Relais, A, A ihre Anker. Die Wirkungsweise, wenn nur eine Seite arbeitet, ist ohne weiteres ersichtlich, die Vorgänge bei gleichzeitigem Arbeiten erklären sich aus den Störungen der Duplexabgleichungen in den Endsystemen, die dadurch entstehen, daß durch das Arbeiten der Gegenstation neue EMK in die Schaltung eingeführt werden.

Die älteren Doppelsprechmethoden, meist in Verbindung mit dem Gegensprechen benutzt, verwenden Tasten besonderer Form und Relais, die zum Teil nur auf Ströme bestimmter Richtung, zum Teil nur auf Ströme bestimmter Stärken ansprechen. Es sind mehr oder weniger komplizierte Kombinationen, die vom physikalischen Standpunkte kein besonderes Interesse haben. Neuere Systeme, die sich allerdings noch wenig eingebürgert haben, benutzen für die beiden in derselben Richtung gehenden Nachrichtenströme elektrische Träger verschiedener Art, z. B. Wechselstrom hörbarer Frequenz und Gleichstrom (Picard), oder Wechselströme verschiedener Frequenz (Mercadier-Magunna), wobei von dem Resonanzprinzip in der einen oder anderen Form Gebrauch gemacht wird. Aus Frankreich werden günstige Erfolge von dem System Mercadier berichtet; als Sender wirken bis zu acht selbsterregende Stimmgabeln, die den Strom in der Primarspule je eines Transformators unterbrechen. Die Sekundarspulen sind über ebensoviele Tasten direkt oder über einen Uebertrager mit der Leitung verbunden, die zwei metallische Zweige hat. An den Empfangstransformator sind Empfänger in gleicher Zahl wie die Sender angeschaltet, die als Resonanztelephone (Monotelephone) dadurch wirken, daß Membranen von geeigneter Stärke so in drei Punkten gelagert sind, daß sie merklich nur ansprechen, wenn ein Strom der Eigenfrequenz auftritt; die Stromsendungen der Taste werden also als kurze oder lange Züge eintöniger Schwingungen aufgenommen.

γ) Gleichzeitige Telegraphie und Telephonie. Eine in bezug auf die Trennung beider Systeme unvollkommene Einrichtung, die aber in der Militärtelegraphie noch verwendet wird, ist 1882 von Rysselberghe für Leitungen mit Erdrückleitung angegeben worden.

Beide Systeme Fig. 15 liegen zwischen derselben Leitung und Erde, indessen das Morse-

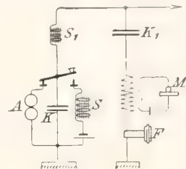


Fig. 15. Schaltung für gleichzeitige Telegraphie und Telephonie auf Einzelleitungen.

system A unter Zufügung von Spulen S und S_1 mit hoher Induktivität, das Fernsprechsystem MF unter Vorschaltung eines Kondensators K_1. Dieser hält die Gleichströme vom Fernsprecher ab, die Spule drängt die Wechselströme vom Morsesystem zur Leitung ab. Außerdem hindert die Spule das plötzliche Ansteigen der Telegraphierströme und vermindert das Knacken, das sie im Fernhörer hervorbringen; diese Wirkung wird durch den Kondensator K zwischen Taste und Erde verbessert. Immerhin hört man die

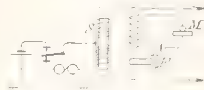


Fig. 16. Schaltung für gleichzeitige Telegraphie und Telephonie auf Doppelleitungen.

Telegraphierströme als dumpfes Geräusch. Heute wird im Betriebe ein System (Fig. 16) verwendet, bei dem die Telegraphierströme überhaupt nicht

in den Fernsprecher eindringen, gute Isolation der Leitungen vorausgesetzt.

Die Fernsprechsysteme MF werden beiderseits durch Drosselspulen S mit zwei gleichen Wickelungen überbrückt, an deren Mittelpunkt die Telegraphensysteme angeschlossen sind. Für die Ströme der letzteren kommt nur der Leitungswiderstand der Wickelungen in Betracht, für die Fernsprechströme bilden sie Nebenschlüsse hoher Induktivität zu den Fernsprechsystemen, die den Sprechstrom nicht merklich schwächen.

Durch eine einfache Verdoppelung dieser Anordnung kommt man zu der Schaltung für Mehrfachtelephonie. Zwei Sprechsätze benutzen jeder eine der beiden Stammdoppelleitungen, während der dritte Satz an den daraus gebildeten ,,Vierer" angeschlossen ist. Solche ,,Kombinationen" sind im Betriebe weit verbreitet. Als Merkwürdigkeit verdient Erwähnung, daß eine solche Kombination zwischen New York und Chicago dadurch noch mehr ausgenutzt wird, daß an jede der vier Leitungen ein Satz Telegraphenapparate nach einem vervollkommneten Rysselbergheschen Verfahren angeschlossen sind.

3d) Hilfschaltungen. Im Kabelbetrieb braucht man zur Verbesserung der Form der ankommenden Zeichen Schaltungen, die die verzögernde Wirkung der Induktivität der Apparate aufheben und die Entladung des Kabels nach Ablauf des Zeichens möglichst fördern. Darunter ist zunächst zu nennen die von W. H. Preece 1888 für den Wheatstoneschen Schnelltelegraphen eingeführte Schaltung, die jetzt als Maxwell-Erde bezeichnet wird.

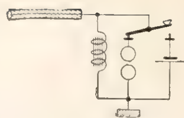
Außer dem Empfänger wird zwischen Kabel und Erde noch ein Kondensator C gelegt (Fig. 17),



Fig. 17. Maxwell-Erde.

der durch einen großen Widerstand R überbrückt ist. Diese Kombination führt einen veränderlichen Widerstand in die Erdleitung ein, der im ersten Augenblick den Wert Null hat und allmählich auf den Wert R ansteigt. Die Stärke der Batterie wird so bemessen, daß der Strom im Endzustande auf den üblichen Wert (15 bis 20 mA) ansteigt; durch den Kondensator wird der mehrere 1000 Ohm betragende Widerstand R für den ersten Anstieg so gut wie kurz geschlossen; der Strom im Empfänger steigt also auf einer viel steileren Linie an, als ohne die Maxwellerde. Während des Abfallens der Zeichenkurve liefert der Kondensator im Kreise eine veränderliche EMK, die derjenigen der Induktivität des Empfängers und derjenigen, die von den geladenen Teilen der Leitung ausgeht, entgegengesetzt gerichtet ist. Bei richtiger Abgleichung kann daher der Kondensator den Entladungsstrom durch den Empfänger so beeinflussen, daß dessen Zeitintegral Null wird.

Eine andere Vorrichtung dieser Art ist die Gegenstromrolle von Godfroy. Sie wird parallel zum Empfangsrelais geschaltet und besteht aus einem regulierbaren Elektromagnet von hoher Selbstinduktivität (Fig. 18).


Fig. 18. Gegenstromrolle.

Solange der positive Strom am Ende ansteigt, fließt durch die Gegenstromrolle ein positiver Strom zur Erde, der allerdings dem Empfangsapparat entzogen wird, was aber durch hinreichende Verstärkung der Batterie ausgeglichen wird. Sobald der positive Zeichenstrom zu fallen beginnt, soll der Anker des Relais den Kontakt möglichst schnell wechseln, also die Stromstärke möglichst schnell sinken. Dies wird dadurch herbeigeführt, daß die Induktivität der Gegenstromrolle den abfallenden Strom auf seiner Stärke zu halten sucht, also dem Kabel und dem Relaiskreis Strom entzieht. Man kann die Induktivität so abgleichen, daß das Zeitintegral des Stromes im Relais Null ist; es hat sich aber durch Versuche ergeben, daß es noch wirksamer ist, wenn die Induktivität so groß gewählt wird, daß die Gegenstromrolle bei fallenden positiven Strömen einen negativen Strom durch das Relais zieht. In ähnlicher Weise wirkt eine am Anfang zwischen Leitung und Erde geschaltete Spule auf die schnelle Entladung des Kabels ein. Maxwellerde und Gegenstromrollen erfordern eine erhebliche Verstärkung der Batterie und, besonders die letzteren, eine starke Erhöhung des Stromverbrauchs, aber sie befreien die Leitung schnell von der darin aufgehäuften Ladung und ermöglichen daher besonders bei Kabeln eine erhebliche Beschleunigung des Betriebs.

3e) Betrieb von Seekabeln. Aus wirtschaftlichen Gründen werden alle längeren Seekabel in Duplexschaltung betrieben, die unabhängige gleichzeitige Korrespondenz in beiden Richtungen ermöglicht. Bei der Ausarbeitung der Schaltungen hat man durch Versuch Verfahren gefunden, die sich, wie K. W. Wagner bemerkt, nach der Theorie daraus rechtfertigen, daß die Kurve des ankommenden Zeichens einen solchen Charakter hat, daß jeder höhere zeitliche Differentialquotient steiler ansteigt, als die vorhergehenden. Man läßt also die Ströme am Anfang oder am Ende oder beiderseits über Kondensatoren gehen, so daß sie gleich der Ableitung der Spannung nach der Zeit werden, oder legt parallel zu den Empfängern große Drosselspulen mit mächtiger Selbstinduktion und kleinem Widerstand, so daß die Spannungen an den Empfängern zeitliche Ableitungen des Leitungsstroms werden.

Das gewöhnlich gebrauchte System ist in Fig. 19 dargestellt.

CC sind zwei Kondensatoren von etwa 40 μ F, die durch einen in 20 Unterabteilungen geteilten Widerstand R von 1 Ohm verbunden sind. Von dem eingestellten Kontakt zweigt der Empfangs-Heberschreiber H zur Erde. Auf der anderen

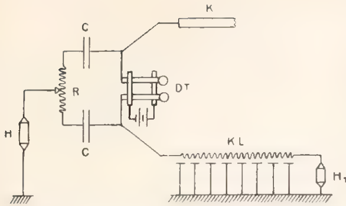


Fig. 19. Gegensprechschaltung für Seekabel.

Seite sind die Kondensatoren mit dem Kabel K und der künstlichen Leitung KL verbunden, und zwischen beide ist die Doppeltaste DT geschaltet. Am Ende der künstlichen Leitung ist in der Regel der Kontrollempfänger H_1 eingeschaltet, der die von DT abgegebenen Zeichen wiedergibt, während H bei richtiger Abgleichung nur die Signale der hier nicht gezeichneten Gegenstation verzeichnet. Die Güte der Abgleichung beruht hauptsächlich auf den Eigenschaften der künstlichen Leitung. Diese enthält in möglichst feiner Unterteilung ebensoviel Widerstand und Kapazität, wie die wirkliche Leitung, so daß sie denselben Stromverlauf wie jene zeigt. Bei richtiger Abgleichung muß also die Schreiblinie des Heberschreibers H ruhig bleiben, wenn nicht von der anderen Seite gegeben wird. Die Verbesserung dieser Abgleichung ist das stete Bemühen der Kabelstationen. Außer der Versteilerung der Zeichenkurven erreicht man durch die Kondensatoren noch die Ausschaltung der Erdströme. Diese werden durch die Potentialschwankungen zwischen den Erdungspunkten des Kabels erzeugt; diese Schwankungen erfolgen so langsam, daß die davon herrührenden Ladungsströme der Kondensatoren unmerklich sind.

Die Arbeitsgeschwindigkeit auf den langen Seekabeln ist verhältnismäßig groß; die einzelnen Zeichen folgen einander in Zeiten, die klein sind gegen die Zeit, die ein einzelnes im wesentlichen ablaufendes Zeichen beanspruchen würde. Die Zeichen überlagern sich daher sehr stark und die Kurve des Verlaufs eines zusammengesetzten Zeichens ist daher die Summenkurve der einzelnen Zeichen mit der entsprechenden zeitlichen Verschiebung. Um die Kurve möglichst nahe der Nullinie zu halten, hat man das Alphabet für Seekabel dahin abgeändert, daß nicht kurze Signale für Punkte und lange gleicher Polarität für Striche gegeben werden, sondern kurze positive für die Punkte und gleich kurze negative für die Striche des Morsealphabets. Gleichwohl können bei der üblichen Geschwindigkeit aufeinanderfolgende Zeichen gleicher Polarität nicht mehr getrennt werden und die Signale machen sich nur durch Wellen mit steileren und flacheren Rücken bemerkbar. So ist das in Fig. 20 abgebildete Zeichen für „pergola" durch den darüber abgebildeten Streifen gegeben worden, bei dem jedes Loch der oberen Reihe eine positive, jedes der unteren Reihe eine negative Stromsendung bedeutet.

3f) **Telegraphenleitungen.** Sie sollen hier nur so weit besprochen werden, als die elektrischen Eigenschaften in Frage kommen; die Statik und die Bauausführung würden

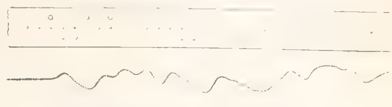


Fig. 20. Sendestreifen und Schriftprobe für Kabeltelegraphie.

sich im Rahmen dieses Aufsatzes nicht in angemessener Form besprechen lassen.

α) **Oberirdische Leitungen.** Die Bedeutung der elektrischen Eigenschaften ist verhältnismäßig am geringsten für oberirdische Telegraphenleitungen. Hier kommt es hauptsächlich darauf an, daß der Widerstand für die vorhandenen Batteriestärken nicht zu hoch ist, und daß die Isolation genügend groß ist, um den zum Ansprechen der Empfangsapparate erforderlichen Strom bis ans Ende der Leitung gelangen zu lassen. Indessen ist dies eine reine Gleichstromaufgabe, während die Frage der Wellenfortpflanzung für die im gewöhnlichen Betriebe vorkommenden Längen oberirdischer Leitungen und üblichen Zeichenfolgen fast ohne Bedeutung ist. Für Telegraphenleitungen wird verzinkter Eisendraht mit einem Widerstand von 132 Ohm für 1 km und 1 qmm Querschnitt verwandt, für internationale und große inländische Verbindungen solcher von 5 bis 6 mm Durchmesser, solcher von 3 mm Stärke für Nebenlinien. Für wichtige lange Telegraphenleitungen wird auch Bronzedraht von 3 mm Stärke (2,64 Ohm/km) benutzt. Zur Isolation dienen in Deutschland ausschließlich Doppelglockenisolatoren aus Porzellan, in drei Größen, während man in anderen Ländern, besonders Amerika, vielfach weniger gut isolierende Glasisolatoren verwendet. Der Isolationswiderstand einer Telegraphenleitung beträgt unter günstigen Verhältnissen 30 bis 40 Megohm für 1 km, er kann aber auch ohne besonderen Fehler auf 1 bis 2 Megohm für 1 km sinken. Leitungswiderstand und Ableitung bewirken zusammen ein Abfallen nicht nur der Spannung, sondern auch des Stromes nach dem Ende der Leitung zu. Ist sie dort über einen Apparat mit verhältnismäßig kleinem Widerstand zur Erde verbunden, so ergibt sich das Verhältnis zwischen Strom J_a am Anfang und Strom J_e am Ende zu

$$\frac{J_a}{J_e} = \frac{1}{2}\left(e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}\right)$$

wo l die Länge der Leitung bedeutet; ist für 1 km R der Leitungs- und W der Isolationswiderstand, so ist $\gamma = \sqrt{R/W}$.

β) **Kabel.** Dort wo die oberirdische Herstellung der Telegraphenlinien auf Schwierigkeiten stößt, also z. B. in großen Städten, in Tunnels, beim Ueberschreiten von Flüssen, legt man die Leitungen in ein Kabel, das je nachdem als Erdkabel in einen danach zugefüllten Graben verlegt, als Flußkabel versenkt, oder in den Städten als Röhren-

kabel in Kanäle eingezogen wird. Zur Sicherung des großen Verkehrs gegen Stürme und Schneeverwüstungen hat man in Deutschland ein großes Netz von Telegraphenkabeln mit Guttaperchaisolation geschaffen; auch London ist mit einigen großen Städten Englands durch unterirdische Telegraphenleitungen verbunden. Abgesehen von diesen Fällen kommen in den Telegraphenlinien über Land nur kurze Kabelstücke vor, während der überseeische Verkehr ausschließliche über Kabel geführt wird.

Vom elektrischen Standpunkte aus muß ein Kabel genügende Leitfähigkeit in dem Leiter und eine gute Isolation besitzen, vom mechanischen Standpunkte aus eine solche Festigkeit, daß es durch die bei der Verlegung und unter Umständen auch später auftretenden Beanspruchungen nicht beschädigt wird. Aus diesen Forderungen ergibt sich die Bedeutung der drei hauptsächlichsten Teile eines Kabels, der Seele, der Isolierung der Ader und der Bewehrung. In der Ausführung unterscheidet man ein- und mehraderige Kabel, solche für Verlegung auf dem Lande und Untersee. Der Aufbau der Kabel hängt von dem verwandten Isoliermaterial ab. Guttapercha und bestimmte Gummimischungen (Okonit) sind so unveränderlich im Wasser, daß man die Isolation des Kupferleiters durch sie allein, ohne anderen Schutz, ausführen kann; die sonst verwendeten Isoliermaterialien (Papier, Faserstoffe) dagegen erfordern zum Schutz gegen die Feuchtigkeit einen das Kabel dicht umschließenden Bleimantel.

$\alpha\alpha$) Seekabel. Als Guttaperchakabel werden heute fast nur Seekabel ausgeführt. Ein solches Kabel enthält eine Kupferseele, die bei kleineren Querschnitten aus einer siebenaderigen Litze aus gleich starken Drähten hergestellt ist, und bei großen Querschnitten aus einem starken inneren Draht, der von 12 und mehr dünneren Drähten umgeben ist. Um diese Seele werden, nachdem die Luftzwischenräume zwischen den einzelnen Drähten durch eine Füllmasse (Compound) ausgefüllt worden sind, in der Regel drei nahtlose Guttaperchaschichten durch Umpressen herumgelegt, von denen jede mit der darauf folgenden durch eine dünne Compoundschicht verklebt ist.

Die Stärke des Kupferleiters und der Guttaperchahülle richten sich nach der von dem Kabel verlangten Sprechgeschwindigkeit, d. h. der Zahl der Wörter, die man in der Minute über das Kabel befördern kann. Diese hängt natürlich auch von den Eigenschaften des Empfangsapparates ab, als welcher meistens der Heberschreiber von Lord Kelvin verwendet wird. Innerhalb dessen Leistungsfähigkeit ist die Sprechgeschwindigkeit etwa gleich 100/CR, wo C die gesamte Kapazität, R der gesamte Widerstand des Kabels ist. Die Kapazität eines Guttaperchakabels ergibt sich angenähert nach der Formel:

$$C = \frac{0{,}2}{\log nat\, r_2/r_1}\ \mu F/km$$

wo r_1 der Halbmesser der Kupferseele, r_2 derjenige der isolierten Ader ist. Im Verkehr wird sie meist durch das Gewicht Ku von Kupfer und Ga von Guttapercha für gleiche Länge angegeben, für deren Zusammenhang mit der Kapazität die Formel gilt:

$$C = 0{,}175 \log brigg\,(1 + 7{,}22\ Ga/Ku)\ \mu F/km.$$

Seekabel für sehr große Längen werden mit Rücksicht auf die Schwierigkeiten der Verlegung einerseits und auf die gegenseitige Induktion andererseits als einaderige Kabel ausgeführt. Bei kleineren Längen, z. B. bei Kabeln zwischen Deutschland und England, verwendet man vieraderige Kabel.

Die Bewehrung hat den Zweck, die Kabelader gegen mechanische Beschädigungen zu schützen und während der Verlegung den Zug aufzunehmen. Sie besteht daher bei Kabeln, die in geringer Tiefe verlegt werden, aus verzinkten Eisendrähten, bei solchen für sehr große Tiefen aus zähesten Stahldrähten. Zwischen der Ader und der Bewehrung liegt zunächst noch ein Polster aus geteerten Jutefäden; mehraderige Kabel werden in der Art verseilt, daß die Zwickel zwischen den einzelnen Adern durch eingelegte Jutetrensen ausgefüllt werden, so daß das Ganze einen möglichst geschlossenen zylinderischen Querschnitt erhält. Um diesen werden die Bewehrungsdrähte spiralig herumgelegt, die in der Regel noch einmal mit asphaltierter Jute umkleidet werden.

Guttaperchakabel, die in flacher See verlegt werden, erhalten zum Schutz gegen Bohrwürmer unmittelbar über der Guttapercha eine Bewickelung mit dünnem, etwas überlappendem Messingband.

$\beta\beta$) Erdkabel. Bei Telegraphenerdkabeln, die meist mit zahlreichen Adern ausgeführt sind, macht sich die Notwendigkeit eines Schutzes gegen die gegenseitigen Störungen geltend. Die Erfahrungen ergeben, daß die Störungen zum größten Teil auf elektrostatische Influenz zurückzuführen sind, indem nämlich die in einer Ader ankommenden verhältnismäßig schwachen Ströme durch die Kapazitätsströme eine Veränderung erfahren, die entstehen, wenn gleichzeitig auf der empfangenden Seite in einer Nachbarader gegeben wird. Die Wirkungen sind um so stärker, je höher die Spannung der störenden Leitung und je größer die Teilkapazität zwischen den Leitern sind. Indessen spielt auch die Strominduktion eine Rolle, was sich daraus ergibt, daß die Störungen nicht völlig verschwinden, wenn man die Adern mit einer leitenden Hülle umgibt.

Zur Abhilfe legt man um die einzelnen Adern geerdete Hüllen aus Kupfer oder Stanniol, oder man benutzt Ausgleichschaltungen, in denen über Kondensatoren außerhalb des Kabels ein dem im Kabel entstehenden Stoß entgegenwirkender erzeugt wird.

C. Theorie der Fortpflanzung telegraphischer Zeichen.

Bezeichnet man die Werte des Widerstandes, der Induktivität, der Ableitung und der Kapazität für die Längeneinheit einer Leitung der Reihe nach mit R, L, A, C, so ergibt sich aus der Beziehung, daß die Aenderung der Spannung V für die (kleine) Längeneinheit gleich der Summe aus dem Spannungsabfall im Widerstand und der EM-Gegenkraft der Induktivität ist, die Gleichung

$$-\frac{\partial V}{\partial x} = RJ + L\frac{\partial J}{\partial t}$$

wo J die Stromstärke, x der Ort auf der Leitung, t die Zeit ist. Weil ferner die Aenderung der Stromstärke für die Längeneinheit gleich der Summe des Ableitungsstromes und des Ladungsstromes ist, so folgt, daß

$$-\frac{\partial J}{\partial x} = AV + C\frac{\partial V}{\partial t}.$$

Man erfüllt diese letzte Gleichung, wenn man setzt

$$V = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad J = A\varphi + C\frac{\partial \varphi}{\partial t},$$

und mit Rücksicht auf die erste Gleichung muß φ der Bedingung genügen

$$AR\varphi + (CR + AL)\frac{\partial \varphi}{\partial t} + CL\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}.$$

Setzt man für den gewöhnlich erfüllten Fall, daß $CR \geqq AL$ ist,

$$\varphi = e^{-\frac{A}{C}t}\,\psi,$$

so ergibt sich

$$(CR - AL)\frac{\partial \psi}{\partial t} + CL\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}.$$

Diese Gleichung hat eine besonders einfache Lösung, wenn $CR = AL$. Dann hat nämlich ψ die Form

$$\psi = f\left(t \mp \frac{x}{v}\right)$$

wo $v = \frac{1}{\sqrt{CL}}$. Jede beliebige Funktion des Arguments $t \mp \frac{x}{v}$ genügt. Dies heißt, daß die Werte, welche die Funktion ψ an der Stelle $x = 0$ im Verlauf der Zeit annimmt, sich um die Zeit $\frac{x}{v}$ später an den Stellen $+x$ und $-x$ in derselben Form wiederholen; auf einer der Bedingung $CR = AL$ genügenden Leitung pflanzt sich also die Funktion ψ als eine zeitlich ungedämpfte und räumlich unverzerrte Welle mit der Geschwindigkeit $v = \frac{1}{\sqrt{CL}}$ fort. Die für Strom und Spannung maßgebende Funktion φ pflanzt sich ebenfalls unverzerrt, aber zeitlich gedämpft mit derselben Geschwindigkeit fort.

Für den allgemeinen Fall führen wir nach Poincaré und K. W. Wagner neue dimensionslose Variable ein

$$X = \frac{x}{2}\left(R - A\frac{L}{C}\right)\sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{R'}{2}\sqrt{\frac{C}{L}}\,x$$

$$T = \frac{R'}{2L}\,t$$

und statt ψ ein Variable $\Phi = \frac{R'^2 C}{4L}\psi$. Dann geht die Gleichung für ψ in die Form über

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial T^2} + 2\frac{\partial \Phi}{\partial T} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2}.$$

In die Integrale dieser Gleichung gehen die besonderen Konstanten einer einzelnen Leitung nur durch die Grenzbedingungen in dem Falle ein, daß die Ableitung berücksichtigt werden muß. Soweit man davon absehen kann, gelten die Integrale dieser Gleichung für alle Arten von Leitungen, während für jede einzelne Leitung nur eine besondere Reduktion des Zeit- und Längenmaßes notwendig ist.

Integrale dieser Gleichung sind von Poincaré und K. W. Wagner angegeben worden. Wegen der Einzelheiten wird auf den Artikel „Kabel" verwiesen. Von den wesentlichen Ergebnissen seien hier folgende mitgeteilt. Zählt man die Zeit von dem Augenblick, wo an den Anfang der Leitung eine EMK angelegt wurde, so ist an der zu X gehörenden Stelle alle Strombewegung identisch Null bis zu dem Augenblick, wo T den Wert X erreicht. Von diesem Augenblick ab verläuft die Stromwelle nach einer Funktion, die mit dem Werte $v_0\sqrt{\frac{C}{L}}e^{-X}$ sprungweise beginnt, und deren Fortsetzung sich als das Produkt aus $v_0\sqrt{\frac{C}{L}}e^{-T}$ und einer Besselschen Funktion nullter Ordnung $J_0(i\sqrt{T^2 - X^2})$ ergibt.

Da $T = X$ dasselbe bedeutet, wie $x = \frac{t}{\sqrt{CL}}$, so pflanzt sich auch im allgemeinen Fall die Welle mit der Geschwindigkeit $\frac{1}{\sqrt{CL}}$ fort, aber ihr zeitlicher Verlauf hängt von dem Ort der Leitung, genauer von dem Werte X ab.

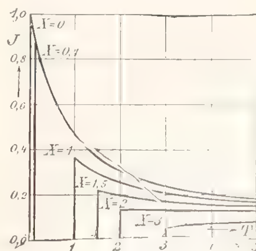


Fig. 21. Kurven des ankommenden Stromes.

Figur 21 gibt in von Wagner berechneten Kurven den Zeitwert des Stromes an ver-

schiedenen Stellen X, bezogen auf den Wert bei T = 0, X = 0 als Einheit.

Bei großen Werten von X ist die Höhe der zur Zeit T = X eintreffenden Wellenfront verschwindend klein gegen die danach ankommenden, langsam ansteigenden Stromwerte, wie z. B. Figur 22 für X = 10 darstellt. Es ist ein wichtiges Ergebnis der Theorie, daß allein der Wert von X, welche Größe wir als Längenmaß der Leitung bezeichnen, über die Form des Zeichens entscheidet, gleichgültig, mit welchen Leitungskonstanten dieser Wert zustandekommt. Obwohl daher bei gegebenen Werten von

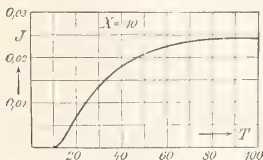


Fig. 22. Ankommender Strom auf Kabeln großer Längenmaßen.

R, A, C und L der Wert von X durch Vergrößerung von L verkleinert wird, kann diese bei kurzen Leitungen, d. h. bei kleinen X sehr nützliche Wirkung keine Aenderung der Stromkurve hervorbringen, wenn das sich ergebende X > 10 bleibt.

Bei langen Seekabeln, die mit dem Heberschreiber betrieben werden, ist X gleich 15 und mehr; bei Landlinien, bei denen Relais als Empfänger dienen, kann man einen sicheren Betrieb bis X = 6 bis 7 aufrecht erhalten.

Literatur. *Allgemeine Darstellungen:* **K. E. Zetzsche,** *Handbuch der elektrischen Telegraphie. Berlin 1877.* — **Scheller-Kareis,** *Der elektromagnetische Telegraph. Braunschweig 1888.* — **Thomas,** *Traité de Télégraphie Electrique. Paris 1894.* — **Karrass,** *Geschichte der Telegraphie. Braunschweig 1909. Spezialgebiete und Theorie:* **Heaviside,** *Electrical Papers, 2 Bde., London 1892.* — **Derselbe,** *Electro magnetic theory, Bd.* **1**, *1893; Bd.* **2**, *1899.* — **Vaschy,** *Traité d'Électricité et de Magnétisme. Paris 1890.* — **Breisig,** *Theoretische Telegraphie. Braunschweig 1910.* **K. W. Wagner,** *Verschiedene Aufsätze in Zeitschriften, abgedruckt in den Mitteilungen aus dem Telegraphen-Versuchsamt, Bd.* **V** *u.* **VI.** *Berlin 1910 u. 1912.* — *Bau:* **Stille,** *Telegraphen- und Fernsprech-Kabelanlagen. Braunschweig 1911.* **Winnig,** *Bautechnik für oberirdische Telegraphenlinien. Braunschweig 1910.* — **Knopf,** *Stromversorgung. Braunschweig 1910. Seekabel:* **M. Bright,** *Submarine Telegraphs. London 1898. — Apparate:* **Kraatz,** *Maschinentelegraphen. Braunschweig 1906.* — **Grallert,** *Mehrfachtypendrucker von Baudot. El. Zeitschr. 1901, S. 282.* **Noebels,** *Haustelegraphie, Leipzig 1905.* — **Korn-Glatzel,** *Handbuch der Phototelegraphie und Telautographie. Leipzig 1911. — Messungen:* **Dreisbach,** *Telegraphen-Meßkunde. Braunschweig 1908. — Die laufende Literatur ist bis 1911 vierteljährlich in den Fortschritten der Elektrotechnik, Berlin, Springer, Abschnitt IX, zusammengestellt.*

F. Breisig.

Telephonie.

A. Allgemeines. B. Fernsprechtechnik. 1. Sprech- und Hörapparate: a) Mikrophon. b) Telephon. c) Gehäuseschaltungen. 2. Leitungsnetz einer Fernsprechanlage: a) Anschlußleitung. b) Hauptverteiler. 3. Zentralumschalter: a) Handbediente Umschalter. α) Vielfachschaltung. β) Zentralbatterie. γ) Schnurpaarsystem. δ) Verteilersystem. ε) Besondere Einrichtungen. b) Selbsttätige Umschalter. α) Wählerapparate. β) Schaltung eines selbsttätigen Amts. γ) Halbautomaten. C. Theorie der Fernsprechverbindungen. 1. Leitungsgleichungen. 2. Charakteristik und Fortpflanzungskonstante. 3. Güte der Verständigung. 4. Leitungen mit erhöhter Induktivität: a) Karup. b) Pupin. α) Theorie der Pupinleitungen. β) Ausführung von Pupinleitungen.

A. Allgemeines.

Während die Apparate der Telegraphie von den ersten Morse-Sendern bis zu den heutigen Maschinentelegraphen eine Entwickelung durchgemacht haben, bei der kaum noch etwas von dem ursprünglichen geblieben ist, sind die telephonischen Sprech- und Hörapparate bald nach ihrer Erfindung zu einer solchen Vollkommenheit gebracht worden, daß auch bis heute daran nur wenig geändert werden konnte. Zwar hat sich das erste, von Philipp Reis 1862 erfundene System nicht durchsetzen können; nachdem aber 1876 G. Bell und E. Gray das elektromagnetische Telephon, 1878 Hughes das Mikrophon erfunden hatten, sind für die Sende- und Empfangsapparate keine neuen Prinzipien mehr aufgestellt, sondern nur noch Verbesserungen im einzelnen gemacht worden. Dagegen hat, wie unter „Telegraphie" bereits erörtert, die Technik der zur Verbindung der einzelnen Sprechleitungen dienenden Apparate bei der Telephonie bisher eine Entwickelung durchgemacht, die immer neue Gesichtspunkte aufgedeckt hat, und sie schreitet noch unaufhaltsam fort.

B. Fernsprechtechnik.

1. Sprech- und Hörapparate. Als Sender wird jetzt überall das Mikrophon benutzt.

1a) Mikrophon. Es besteht aus einem losen Kontakt zwischen der die eine Elektrode eines Kreises bildenden, durch die Schallwellen

in Schwingungen versetzten Membran oder einer geeigneten Erweiterung der Membran und einer zweiten festen Elektrode. Im einzelnen gibt es eine fast unabsehbare Zahl von Konstruktionen. Figur 1 zeigt die Anordnung des in Deutschland gebräuchlichen Kohlenkörnermikrophons. In das Gehäuse B, das an dem mit Schalltrichter T versehenen Deckel D befestigt ist, wird eine auswechselbare Kapsel K eingesetzt, in der sich eine Kohlenscheibe S mit sieben muldenförmigen Vertiefungen befindet. Jede davon wird mit einer Anzahl kleiner harter Kohlenkugeln gefüllt, und dann wird die Kapsel durch eine dünne Kohlenscheibe p abgeschlossen, die so nahe vor den Rändern der Vertiefungen liegt, daß die Kohlenkörner bei senkrechter Stellung der Membran nicht durchfallen können. Die Abbildung zeigt die Verbindung der beiden Elektroden mit den Zuführungen a und b deutlich an.

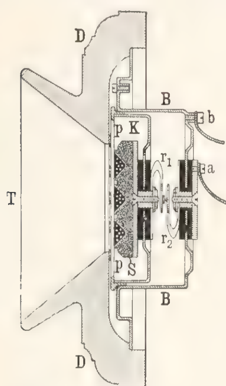


Fig. 1. Körnermikrophon.

1 b) Telephon. Die heute gebräuchlichen Telephone bestehen noch immer aus einem Dauermagnet, dessen Polschuhe die Stromspulen tragen und eine den Schall wiedergebende Eisen- oder Stahlplatte mit einer nach der Stärke der Leitungsströme veränderlichen Kraft anziehen. Gegen die ersten Modelle sind sie dadurch verbessert, daß statt eines Stabmagnets ein Hufeisenmagnet oder Ringmagnet angewendet wird, der mit der Membran einen fast geschlossenen magnetischen Kreis bildet.

Es sind hauptsächlich zwei Muster gebräuchlich: im Bereich der deutschen Fabrikation der Fernhörer mit Ringmagnet, Figur 2, im Bereich der amerikanischen der mit langem Hufeisenmagnet. In Deutschland ist sehr beliebt der Handapparat, eine Kombination von Mikrophon und Telephon,

Zur Theorie dieser Apparate ist wenig zu sagen, da die Wirkungsweise aus den Anordnungen unmittelbar hervorgeht. Es kann sich höchstens um Feststellungen im einzelnen handeln. Bei einem Mikrophon hat Breisig durch Messungen festgestellt, daß es, durch andauernde gleichmäßige Schallwellen einer bestimmten Frequenz erregt, in seinen Leitungszweig eine andauernde EMK derselben Frequenz einführt, die wenigstens in weiten Grenzen unabhängig von der Stromstärke des erzeugten Wechselstroms ist. Auf dieser Grundlage kann man für Berechnungen ein Mikrophon wie einen Wechselstromgenerator behandeln.

Die Theorie des Telephons ist von Wietlisbach gegeben und von Poincaré rechnerisch erweitert worden. Indessen führen Rechnungen hierbei kaum zu neuen Ergebnissen. K. W. Wagner hat die bisher ausführlichsten Messungen über den Scheinwiderstand des Telephons bei verschiedenen Frequenzen und über die einzelnen Verlustquellen veröffentlicht und so den Weg zu rationellen Verbesserungen im einzelnen gezeigt, deren praktischer Erfolg indessen nach der Natur der Sache nur gering sein kann.[1])

1 c) Gehäuseschaltungen. Um nun mittels dieser Apparate ein Gespräch mit einer Gegenstation führen zu können, hat man an beiden Stellen die Apparate in einer dem Zweck geeigneten Weise zu schalten. Die

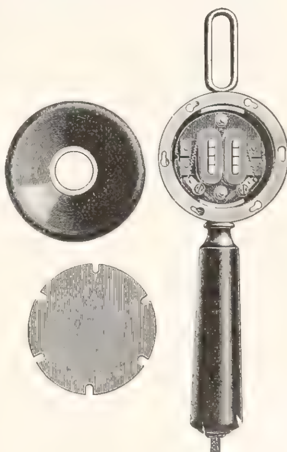


Fig. 2. Telephon.

Zahl der vorgeschlagenen Anordnungen ist außerordentlich groß.

Man kann darin zwei Klassen unterscheiden, solche bei denen jede Station eine besondere Stromquelle hat (Ortsbatterie, OB) und solche, bei denen die zum Betriebe erforderliche Energie von einer gemeinsamen, in der Vermittelungstelle befindlichen Batterie hergegeben wird (Zentralbatterie, ZB). Bei

[1]) vgl. unter C 3.

den OB-Apparaten muß noch eine besondere Stromquelle zum Anrufen des Amts vorgesehen werden, meist ein Induktor, und daher eine Umschaltevorrichtung, die für die verschiedenen Stadien einer Verbindung, nämlich Anrufen, Gerufenwerden, Sprechen ausreicht. Wegen dieser Nebenapparate ist die OB-Schaltung verwickelter, als die ZB-Schaltung und wir beschränken uns daher auf die typische Darstellung ohne Anrufapparate in Figur 3.

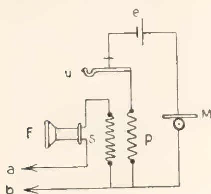


Fig. 3. Gehäuseschaltung für Ortsbatterie.

Jeder Fernsprechapparat enthält einen Umschalter u, meist in Form eines Hebels mit Haken, an den in der Ruhe der Fernhörer F angehängt wird. In der Ruhe ist daher der Mikrophonkreis unterbrochen. Nimmt man den Hörer ab, so bildet das Mikrophon einen Ortskreis Mpe, der die dem Widerstand des Mikrophons angepaßte Primärspule p enthält, während das Telephon mit der Sekundärspule s und der Leitung den äußeren Kreis bildet. Da die durch das Mikrophon im Ortskreis hervorgebrachten Widerstandsänderungen verhältnismäßig sehr groß sind, so gibt die OB-Schaltung in bezug auf die Stärke und auch die Klarheit der Sprache sehr gute Resultate; sie steht leider in bezug auf den Umschaltebetrieb der ZB-Schaltung so sehr nach, daß man in modernen Anlagen nur die letztere anwendet.

Von den für die ZB-Schaltung gebräuchlichen Formen sei die als Ericssonsche bezeichnete hier angegeben (Fig. 4). Auf dem Vermittelungsamt,

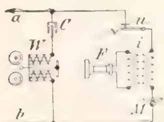


Fig. 4. Gehäuseschaltung für Zentralbatterie.

zu dem die Leitungen a und b führen, befindet sich die ZB, außerdem liegen dort in den Leitungen Anrufzeichen. In der Ruhe öffnet das Gewicht des Fernhörers den Schalter u, das Mikrophon M ist stromlos; der zum Anrufen der Sprechstelle dienende Wecker W ist gegen den Gleichstrom durch den Kondensator C gesperrt; indessen kann der zum Anrufen des Teilnehmers vom Amt ausgesandte Wechselstrom von 15 Perioden den Wecker erregen. Beim Sprechen bildet der Wecker einen Seitenweg hoher Induktivität, der die Sprechverständigung nicht beeinflußt, der Fernhörer erhält Strom durch Uebertragung mittels der Induktionsspule i.

B r e i s i g hat Messungen über die Energieverteilung in einer Schaltung dieser Art ausgeführt, aus der sich ergeben hat, daß von der einer solchen Anordnung an den Leitungsklemmen in Form eines Wechselstroms von $\omega = 5000$ zugeführten Leistung gegen 70 % allein im Widerstand des Mikrophons verloren gehen, noch 11 % im Wecker und der Spule, und daß nur gegen 18 % an den Klemmen des Fernhörers verfügbar bleiben. Hiervon kommt nur ein kleiner Teil für die Umsetzung in Schall in Betracht, während der größte Teil in elektrischen und mechanischen Widerständen verzehrt wird.

2. Leitungsnetz einer Fernsprechanlage. 2a) A n s c h l u ß l e i t u n g. Sie verbindet die Sprechstelle mit der Vermittelungsstelle. In den ersten 15 bis 20 Jahren der Entwickelung hat man versucht, auch für die Fernsprechleitungen Einzelleitungen mit Erde als Rückleitung zu nehmen: die Ausbreitung der elektrischen Straßenbahnen machte dies aber auf die Dauer unmöglich, da deren Rückströme sich über die Erdplatten in die Fernsprechleitungen verzweigten und einerseits Betriebsstörungen durch falsches Ansprechen der Rufzeichen und der Besetztprüfung hervorriefen, andererseits die Sprachübertragung durch Ueberlagerung der Bahnströme störten, bei denen die Kollektorschwankungen der laufenden Motoren deutlich zu hören waren. Außerdem drängten die ververbesserten Unschalteeinrichtungen zum Betrieb in rein metallischer Leitung. Man ist ferner bei den Fernsprechleitungen schon früh zum Ersatz des Eisendrahts durch Hartbroncedraht übergegangen, weil der Eisendraht infolge des durch Oberflächenwirkung vermehrten Widerstandes sich nur wenig eignet; damals schrieb man dies allerdings seiner hohen Induktivität zu.

F e r n s p r e c h k a b e l. In den Fernsprechnetzen, abgesehen von kleinen Verhältnissen, werden die Teilnehmerleitungen durch Kabel in die Vermittelungsanstalt eingeführt, in Bezirken mit geringer Teilnehmerdichte allenfalls noch bis zu einem Sammelpunkt oberirdisch und dort an ein Kabel angeschlossen. Die neuerdings mehr und mehr eingeführten ZB-Systeme, die eine hohe Isolation der Leitungen voraussetzen, machen die vollständig unterirdische Führung der Leitungen dringend wünschenswert.

Teilnehmerkabel bestehen aus Doppelleitungen. Kupferdrähte von 0,8 mm Durchmesser, bei kurzen Anschlußlängen auch von 0,6 mm Durchmesser werden zunächst einzeln mit einer oder zwei Lagen Papier besponnen, dann zu je zweien zu einer Doppelader verdrillt. Diese werden dann in Schichten mit wechselndem Umlaufsinn in der erforderlichen Anzahl verseilt; bei 0,8 mm Drähten bis zu 500 Paaren, bei 0,6 mm Drähten bis zu 600 Paaren. Das soweit fertige Kabel erhält eine Papier- und Bandbewickelung, wird im Vakuum getrocknet und dann mit einem Bleimantel umpreßt, der zur Erreichung größerer Zähigkeit 3 % Zinn enthält; der äußere Durchmesser geht bis zu 70 mm.

In den Städten werden die Kabel meistens in Zementkanäle mit 10 cm weiten Oeffnungen eingezogen. In diesem Falle bleibt der Bleimantel unbedeckt. Sollen die Kabel als Erd- oder Flußkabel verlegt werden, so erhalten sie über dem Bleimantel noch eine Bewehrung aus verzinkten Drähten.

Die elektrischen Eigenschaften der Anschlußleitungen sind bei 0,8 mm Durchmesser etwa 70 Ohm und 0,035 μ F für 1 km, bei einem Isolationswiderstand gegen Gleichstrom von mindestens 500 Megohm für 1 km. Die Induktivität beträgt etwa 0,0005 H/km.

2 b) Hauptverteiler. Die Kabel, in denen die Teilnehmerleitungen dem Amt zugeführt worden sind, werden in einem geeigneten Raum durch Endverschlüsse abgeschlossen und durch dünnere Gummiaderkabel fortgesetzt bis zum Hauptverteiler. Dieser hat die Aufgabe, die dem Teilnehmer zugewiesene Anschlußnummer des Zentralumschalters durch eine ausgehende Leitung mit seiner Wohnung zu verbinden, und da man auf einen Wechsel der Wohnung gefaßt sein muß, so muß diese Verbindung lösbar sein.

Der Hauptverteiler besteht aus einem eisernen Gestell, das auf der einen Seite senkrechte Klemmenleisten zum Anlegen der Adern der Außenkabel trägt, während auf der anderen Seite die Adern der zu den Umschaltern führenden Kabel an wagerechte Klemmenleisten angelegt sind. Diese „Klemmenleisten" sind heute fast ausschließlich mit Lötösen besetzt, an welche die Adern angelötet werden. Die auf der Kabelseite tragen gleichzeitig noch die zwischen Außen- und Innenleitung zu schaltenden Blitzschutz- und Sicherungsvorrichtungen. Figur 5 zeigt, wie eine Doppelleitung aus den im Schnitt gezeichneten Außenkabeln durch die Sicherungen hindurchgeht und dann durch einen doppelten Schaltdraht zu einem bestimmten Lötösenpaar auf der anderen Seite geführt wird, an das die zugehörige Ader des horizontal liegenden Innenkabels angeschlossen ist. Der Schaltdraht kann dabei durch mehrere Etagen des Verteilers gezogen worden sein.

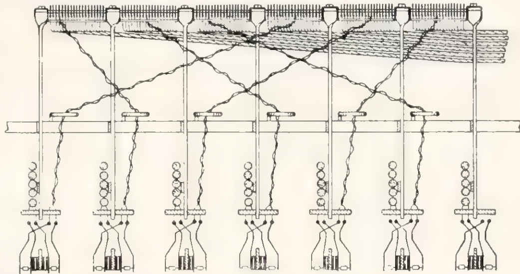


Fig. 5. Hauptverteiler.

3. **Zentralumschalter.** 3a) Handbediente Umschalter. Ihre Aufgabe ist, die Verbindung der Leitung eines rufenden Teilnehmers mit dem von ihm gewünschten zu ermöglichen. Dazu ist für jeden Teilnehmer ein Anrufzeichen und ein Verbindungselement erforderlich. In den einfachsten Verhältnissen werden die Verbindungselemente (Klinken) der beiden Teilnehmer durch eine leitende Schnur mit Stöpseln verbunden. Wird die Zahl der Teilnehmer größer, als daß eine Beamtin alle ungefähr gleichzeitig einlaufenden Anrufe erledigen kann, so muß die Arbeit des Verbindens auf mehrere Beamtinnen verteilt werden, und damit die der einen Beamtin zugewiesenen Teilnehmer mit den anderen in Verkehr kommen können, sind entweder zwischen den Beamtinnen Verbindungsleitungen vorzusehen, oder vor jeder Beamtin sind die Verbindungsklinken sämtlicher Teilnehmer des Netzes anzubringen. α) Vielfachschaltung. Im letzteren Falle, den man Vielfachschaltung nennt, sind also für jeden Teilnehmer so viele Verbindungsklinken im Amte anzubringen, wie Gruppen für die Anrufzeichen gebildet sind. Jede solche Gruppe, ein Schrank genannt, enthält etwa 400 Anrufzeichen an drei Arbeitsplätzen, so daß also für ein Amt mit 8000 Teilnehmern 20 derartige Schränke aufgestellt werden müssen. Die Verbindungsklinken, in der Reihenfolge ihrer Nummern angeordnet, bilden das Klinkenfeld, das den obersten Teil des Schranks einnimmt, darunter befinden sich Klinken für besondere Zwecke, und zu unterst die Anrufzeichen. Letztere brauchen nicht

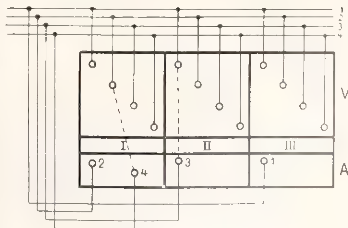


Fig. 6. Prinzip des Vielfachumschalters.

nach der Nummer geordnet zu sein. Schematisch stellt dies Figur 6 für 4 Leitungen dar, die in drei Schränken endigen.

Die Verbindungsklinken der einzelnen Teil-

nehmer haben also in jedem Schrank dieselbe relative Lage. Der Anruf jedes Teilnehmers erscheint in dem Schrank, in welchem er sein Rufzeichen hat, z. B. der von 3 im Schrank II. Indem man die mit dem Anrufzeichen vereinigte Anrufklinke von 3 mit der in dem Felde darüber aufzusuchenden Verbindungsklinke, z. B. 1 im Schrank II verbindet, stellt man Verbindung zwischen den beiden Teilnehmern her. Aehnlich wird also Teilnehmer 4, der Teilnehmer 2 anruft, verbunden, indem die Anrufklinke 4 in I mit der Verbindungsklinke 2 in I verbunden wird, nicht etwa mit der Anrufklinke von 2 in I, da diese der Beamtin der Nummer nach in der Regel nicht bekannt ist.

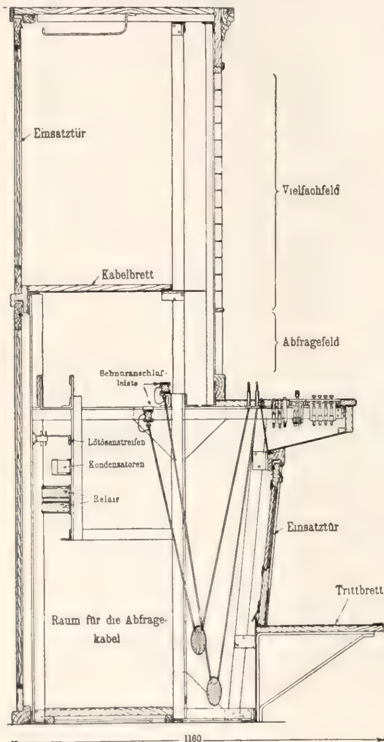


Fig. 7. Schnitt durch einen Vielfachschrank.

Zur Verbindung dienen im allgemeinen Schnurpaare, die in Stöpseln endigen. Diese sitzen auf einem vor dem Schrank befindlichen Pult derart auf, daß die Schnüre, durch Gewichte gespannt, verdeckt verlaufen.

Figur 7 zeigt den Schnitt durch einen solchen Schrank, an dem man den Raum für das Vielfachfeld und das Abfragefeld, sowie für die Kabel erkennt, ferner das Pult (Stöpselbrett) mit dem Stöpseln und davor den später zu erwähnenden Schlußlampen und Sprechumschaltern.

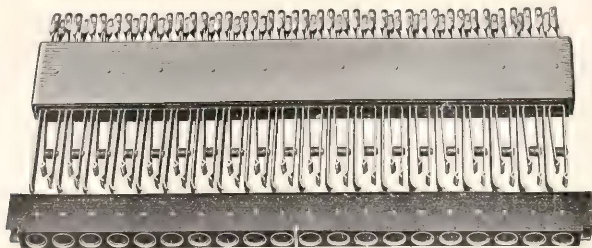
Figur 8 zeigt einen Klinkenstreifen des Vielfachfelds, an dem man an der vorderen Seite die 2 × 10 Klinkenhülsen erkennt, im mittleren Teil zu jeder Klinke zwei Kontaktfedern und am Ende die Lötösen für die drei Zuleitungen zur Hülse und den beiden Federn. Von Mitte zu Mitte Klinke beträgt der Abstand nur 10,5 mm.

Fig. 9 stellt dar, wie ein in eine etwas anders geformte Klinke eingesetzter Stöpsel die Kontakte schließt.



Fig. 9. Klinke und Stöpsel.

Die vorstehend in allgemeinen Zügen beschriebene Verbindung von zwei Teilnehmern an einem Vielfachumschalter kann auf verschiedene Arten ins Werk gesetzt werden, denen das Vielfachprinzip gemeinsam ist, während sie sich in den Einzelheiten der Verbindungsweise unterscheiden. So können die Vielfachklinken in Reihe geschaltet sein, oder was heute allgemein üblich ist, in Parallelschaltung von einer Stammleitung abgezweigt werden. Ferner


Fig. 8. Klinkenstreifen.

ist die Schaltung innerhalb des benutzten Schnurpaar-Systems verschieden. Diese Unterschiede liegen nicht nur in der Speisung nach dem OB- und dem ZB-System begründet, sondern innerhalb jedes Systems gibt es eine Menge Varianten, die nur den Spezialisten interessieren. Wir wollen ein in Deutschland gebräuchliches ZB-System näher betrachten.

β) Zentralbatterie. Man verwendet als eine solche meist eine Sammlerbatterie von 12 Zellen mit einer Kapazität bis zu einigen Tausend Amperestunden und einem Entladestrom bis zu mehreren Hundert A. Sie hat eben nicht nur die Sprechströme, sondern auch die Signalströme zu liefern. Eine solche Stromquelle hat einen verschwindend kleinen Widerstand, und daher können mehrere Sprechkreise angeschlossen werden, ohne sich zu stören, wenn der gemeinsame Widerstand in der ZB nur ein kleiner Teil ihres gesamten Widerstandes ist. Das Grundschema für ZB-Betrieb ist daher, daß man jedes Paar Leitungen, die miteinander sprechen sollen, von einem gemeinsamen Widerstand vor der ZB abzweigt, andere Paare von anderen Widerständen. So würden nach Fig. 10 die Teilnehmer 1 und 2 untereinander

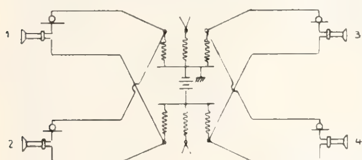


Fig. 10. Prinzip des Zentralbatterie-Systems.

verkehren können, ebenso 3 und 4. Dagegen hören 1 und 2 nichts von 3 und 4, so lange die Verbindungen bis zur Abzweigung der Widerstände R genügende Leitfähigkeit besitzen. Von denselben Schienen können beliebig viele Widerstände abzweigen, an die wiederum Leitungspaare anschließen. Die ZB wird stets an einem Pol geerdet, um Mitsprechen bei Erdfehlern in den Leitungen zu vermeiden. Man verwendet in vielen Systemen die Abzweigwiderstände gleichzeitig als Bewickelungen der Elektromagnete, die zur Ueberwachung der Gesprächsvorgänge dienen, oder gibt ihnen die Gestalt von Drosselspulen oder Uebertragern, um hohen wirksamen Widerstand mit geringem Leitungswiderstand zu verbinden.

γ) Schnurpaarsystem. Wir besprechen die Funktion eines derartigen Systems an der schematischen Zeichnung Figur 11, welche die Verbindung zweier Teilnehmerkreise nach dem System von Siemens und Halske darstellt, allerdings ohne die Einzelheiten der Einrichtungen zum Abfragen und Anrufen.

Die Schaltung teilt sich natürlicherweise in drei Teile, die durch das Einsetzen der Stöpsel in die Klinken verbunden werden. A sei der anrufende Teilnehmer. Wenn er beim Abnehmen seines Telephons den Leitungskreis schließt, so geht aus der ZB (sie ist hier der Uebersicht halber dreimal gezeichnet, statt von einer Batterie Zuleitungen zu zeichnen), ein Strom, der das Anrufrelais AR_1 erregt. Dessen 800 Ohm-Wickelung überwiegt, sie legt den Anker nach links und schließt den Kontakt für den (nicht gezeichneten) Stromkreis der Anruflampe, die auch aus der ZB gespeist wird. Die Beamtin setzt darauf den Abfragestöpsel AS eines freien Schnurpaars, im mittleren Teile der Zeichnung, in die Abfrageklinke Ka_1 des rufenden Teilnehmers und stellt einen als Sprechumschalter bezeichneten Schalthebel u, der sich auf dem Stöpselbrett vor ihr befindet, so, daß ihr Sprechapparat mit dem anrufenden Teilnehmer verbunden ist. (Diese Lage des Umschalters u ist hier nicht gezeichnet.) Durch das Einsetzen des Stöpsels bei Ka_1 tritt im Anrufrelais AR_1 eine andere Stromverteilung ein, wodurch die Wickelung mit 150 Ohm das Uebergewicht erhält und den Kreis der Anruflampe öffnet. Nach Entgegennahme der gewünschten Nummer prüft die Beamtin mit der Spitze des Verbindungsstöpsels VS die Hülse der ihr zugänglichen Verbindungsklinke K_2 des zweiten Teilnehmers. Hat er sein Telephon abgenommen, so hat diese Stelle wegen des Spannungsabfalls in der 150 Ohm-Wickelung ein Potential gegen Erde, also hört dann die Beamtin in ihrem Kopffernhörer ein Knacken, das ausbleibt, wenn bei freier gewünschter Leitung die Hülse der Klinke K_2 ohne Spannung an Erde liegt.

Ist die gewünschte Leitung frei, so setzt die Beamtin den Verbindungsstöpsel ein und gibt dem Sprechumschalter u eine andere Lage, in der er nämlich einen Rufstromgenerator auf die gewünschte Leitung schaltet, und danach gibt sie ihm die Durchsprechstellung, die der Zeichnung entspricht. Bei neueren Aemtern ist die Einrichtung so getroffen, daß der Rufstrom in regelmäßigen Intervallen von 6 Sek. wiederholt

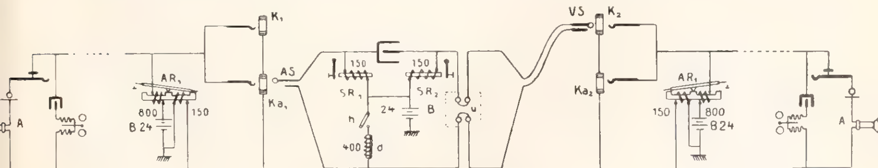


Fig. 11. Schnurpaarschaltung.

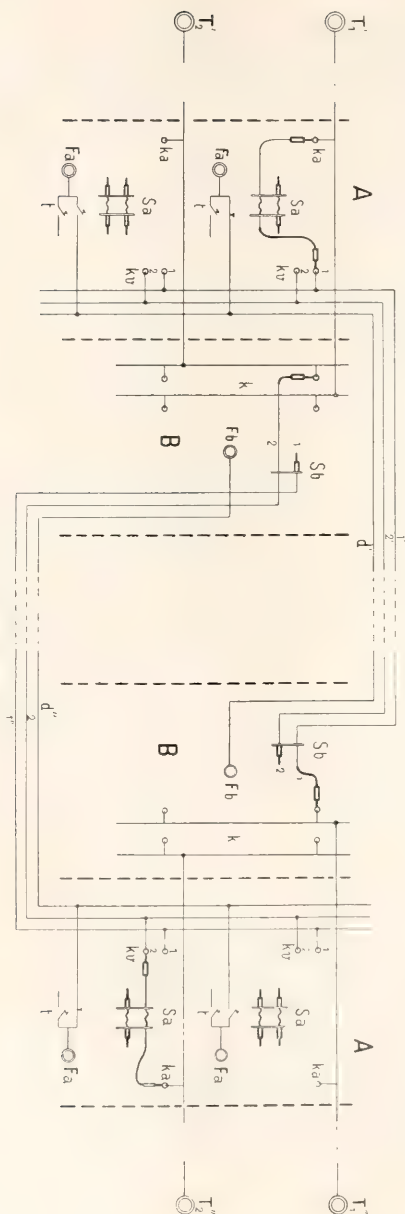


Fig. 12. Verteiler-System.

wird, bis der Teilnehmer sich meldet, und daß dann der Sprechumschalter selbsttätig in die Stellung übergeht, in der beide Teilnehmer miteinander durchverbunden sind. Wir haben noch nicht die Funktion der Apparate SR_1 und SR_2 (Schlußzeichenrelais) im Schnurpaar besprochen. Man erkennt in ihnen leicht die Verzweigungswiderstände des Schemas Figur 10 wieder. Sie sind aber als Elektromagnete ausgebildet, die unerregt den Stromkreis je einer ebenfalls aus der ZB gespeisten Glühlampe (nicht gezeichnet) schließen. In deren gemeinsamer Leitung zum zweiten Pol der ZB liegt noch ein Hebelumschalter h, der erst geschlossen wird, wenn der Abfragestöpsel aus seinem Lager genommen wird. Die beiden zu SR_1 und SR_2 gehörenden Lampen, die sich vor dem Sprechumschalter im Pult versenkt befinden, leuchten also auf, sobald der Abfragestöpsel hochgehoben wird. Sobald er in die Klinke eingesetzt, und dadurch SR_1 erregt wird, erlischt die dazu gehörende Lampe, so lange A sein Telephon nicht anhängt. Beim Einsetzen des Verbindungsstöpsels in die Klinke des gerufenen Teilnehmers bleibt SR_2 wegen der Drosselspule d, die den Rufstrom abdrängt, unerregt, bis der Teilnehmer sein Telephon zur Hand nimmt. Die Beamtin hat jetzt alle zu dieser Verbindung erforderlichen Verrichtungen ausgeführt, was durch das Erlöschen beider Lampen angezeigt wird. Sobald einer der Teilnehmer den Hakenumschalter niederdrückt, durch Anhängen des Telephons oder von Hand, leuchtet seine Schlußlampe auf. Wenn dies bei beiden der Fall ist, trennt die Beamtin die Verbindung, und mit dem Niedersetzen des Abfragestöpsels sind beide Lampen wieder dunkel.

Eine einzelne Beamtin hat an ihrem Drittel des Schrankes 80 bis 300 Anrufzeichen, die untere Grenze bei Teilnehmern mit lebhaftem Verkehr, die obere bei Wohnungsanschlüssen mit geringem Verkehr. Zur Erledigung der Anrufe stehen ihr 18 Schnurpaare zur Verfügung. Wie schon erwähnt, liegen die Anrufklinken nicht wie die Vielfachklinken der Reihe nach, vielmehr werden sie durch einen zweiten Verteiler, den Zwischenverteiler, so auf die einzelnen Arbeitsplätze verteilt, daß deren Inanspruchnahme möglichst gleichmäßig ist.

δ) Verteilersysteme. Wenn in großen Fernsprechnetzen ein Teilnehmer einen anderen anruft, der nicht demselben Amt angehört, so wird er nach dem älteren Verfahren von

der ihn abfragenden Beamtin seines eigenen Amts mittels der Verbindungsklinken, die in einem Streifen zwischen dem Vielfachfeld und den Anrufzeichen liegen, nach dem anderen Amt durchverbunden, worauf dessen Beamtin nochmals abfragt und verbindet. Soweit die Tätigkeit der ersten Beamtin in Betracht kam, brauchte sie kein Vielfachfeld, dies lag also während dieser Zeit bei ihr unbenutzt; durch die Mitwirkung des wenig erfahrenen Teilnehmers in den folgenden Stadien der Verbindung braucht diese mehr Zeit, als wenn nur geschulte Kräfte dabei beteiligt wären. Erhöhte Geschwindigkeit und bessere Ausnützung der Anlage sind die Vorteile der neuen Verteilersysteme. Die Tätigkeit des Abfragens und Verbindens wird auf zwei Beamtinnen derart verteilt, daß der Teilnehmer nur mit einer zu tun hat. Figur 12 stellt das Prinzip dar.

Jedes Amt hat besondere Abfrage-(A)-Plätze und Verbindungs-(B)-Plätze; zwischen den A-Plätzen und den B-Plätzen sowohl desselben Amts als der übrigen bestehen Verbindungsleitungen. Die A-Plätze haben von den ihnen zugewiesenen Teilnehmern nur die Anrufzeichen und die Abfrageklinken ka, die Verbindungsplätze von sämtlichen Teilnehmern nur das Vielfachklinkenfeld k. Die A-Beamtin hat Schnurpaare mit Signalen, sie fragt den Teilnehmer in der üblichen Weise nach dem Einsetzen des Abfragestöpsels ab. Er nennt Amt und Teilnehmer. Die A-Beamtin kann sich durch Druck auf eine Taste t mit dem Sprechsatz Fa in eine zu dem gewünschten Amt führende Leitung d′ einschalten. Diese Leitung endet dort an einem B-Platz bei einer Beamtin, die dauernd mit dem Fernhörer Fb in diese Leitung, die Dienstleitung, eingeschaltet ist. Auf der A-Seite des ersten Amtes steht die Leitung d′ nicht einer Beamtin allein, sondern mehreren (15 bis 20) zur Verfügung, deren jede sich durch ihre Taste einschalten kann. Figur 12 stellt dies an zwei A-Plätzen dar. Natürlich hat jede A-Beamtin eine Taste für eine Dienstleitung auch zu den anderen Aemtern. Von den A-Plätzen des einen Amts gehen neben der Dientleitung Verbindungsleitungen zu dem betreffenden B-Platz des anderen, die dort in Schnurstöpseln Sb enden; ihre Zahl (20 bis 30) richtet sich nach dem Maß der Verkehrs. Auf der A-Seite sind sie vielfach an Klinken kv geführt, so daß sie jeder A-Beamtin, die sich der Dienstleitung bedienen kann, zugänglich sind. Nachdem die A-Beamtin sich eingeschaltet hat, wartet sie das Freiwerden der B-Beamtin ab und nennt ihr die gewünschte Teilnehmernummer; die B-Beamtin nimmt einen freien Stöpsel Sb auf, nennt der A-Beamtin seine Nummer, z. B. 1 und setzt den Stöpsel in die Klinke k des Vielfachfeldes. Die A-Beamtin setzt den Verbindungsstöpsel Sa in die mit dem Stöpsel Sb gleichnamige Klinke kv. Sobald die B-Beamtin die Nummer des Stöpsels genannt (und diesen eingesetzt hat), weiß eine etwa wartende andere A-Beamtin, daß die B-Beamtin wieder frei ist. So werden von einer B-Beamtin bis zu 500 Verbindungen in der Stunde ausgeführt. Da das Vielfachklinkenfeld viel mehr ausgenutzt wird, kommt man also mit erheblich weniger Feldern für eine gegebene Teilnehmerzahl aus.

ε) Besondere Einrichtungen. Neben den Ortsämtern gehören zu großen Fernsprechanlagen noch besondere Fernämter, in denen die Verbindungen mit den Leitungen, die zum Verkehr der verschiedenen Städte untereinander dienen, hergestellt werden. Wegen dieser Einrichtungen, ferner der Nebenstellen oder privaten Zweigämter, der Hausfernsprechanlagen (Linienwähler), sowie der Gesprächszähler wird auf die Literatur verwiesen.

3 b) Selbstätige Fernsprechumschalter. Die großen Unkosten für die Besoldung des Personals, die Notwendigkeit großer Betriebsräume mit den erforderlichen hygienischen Einrichtungen, die Schwierigkeit, im Dienstplan ohne unnötigen Aufwand jederzeit die Möglichkeit der Verbindung vorzusehen und noch andere Eigenschaften des Handbetriebes haben zu dem Bestreben geführt, den Handbetrieb bei den Verbindungen der Teilnehmer untereinander, die stets dieselben Handreichungen erfordern, durch den Betrieb selbsttätig arbeitender Mechanismen zu ersetzen. Die Schwierigkeit, deren Funktion auf engen Raum auch nur für eines der Systeme darzustellen, liegen im Vergleich zu denen bei Beschreibung eines Handamts darin, daß bei diesem nur komplizierte Stromläufe, aber mit Apparaten von einfacher Wirkungsweise zu erläutern sind, während es bei dem selbsttätigen Betrieb notwendig wäre, zuerst die mechanische Konstruktion und die Arbeitsweise der Wähler zu beschreiben, ehe man die Schaltungsanordnungen erörtert. Dies ist bei dem verfügbaren Raum unmöglich. Wir müssen uns daher damit begnügen, zwei Apparatformen vorzustellen und ihre Funktionen summarisch anzugeben.

α) Wählerapparate. Wir beginnen mit den Vorwählern, Figur 14, nach einer in Deutschland gebräuchlichen Ausführung der Siemens und Halske A.-G. Diese Apparate haben die Eigenschaft, daß sich ihr Schaltorgan, das drei Kontaktarme trägt, nach erfolgter Erregung des Elektromagnets schrittweise in Gang setzt, bis der eine der drei Kontaktarme, der Sucher, auf eine unbesetzte Leitung trifft. Dann bleibt der Vorwähler stehen und verbindet die Anschlußleitung mit der gesuchten weiterführenden. Der Vorwähler dient so dazu, aus zehn der gleich zu erwähnenden Wähler einen freien herauszusuchen. Die zweite Form heißt je nach der Verwendung Gruppen- oder Leitungswähler, Figur 13 nach der Ausführung derselben Firma. Er hat eine senkrechte Welle, die durch einen Hubmagnet H mit einer in die Querverzahnung e eingreifenden Schaltklinke schrittweise bis zu 10 Stufen gehoben, und dann durch einen Drehmagnet Dr und die Längsverzahnung d schrittweise bis zu 10 Schritten gedreht werden kann, so daß die am unteren Ende sitzenden Schaltarme, deren jeder

über ein Feld von 100 Kontakten, je zehn in einer Horizontalreihe, streicht, vor einen beliebigen Kontakt, und zwar alle vor den gleich bezifferten gebracht werden können. Zu diesen Wählern gehört noch ein Schalter besonderer Art, der Steuerschalter, der entsprechend den einzelnen, sich stets wiederholenden Stadien der Verbindung, bestimmte Schaltungen ausführt, die hier übergangen werden können. Werden die Wähler zweiter Form als Gruppenwähler verwendet, so werden sie durch Schaltströme, die der Teilnehmer sendet, bis in eine bestimmte wagerechte Reihe gehoben und laufen dann, infolge der vom Steuerschalter herbeigeführten Lage selbsttätig weiter, bis sie eine unbesetzte Kontaktleitung finden; als Leitungswähler dagegen werden sie sowohl in senkrechter als auch in wagerechter Richtung durch Schaltströme gelenkt, die der Teilnehmer entsendet. Zu diesem Zweck enthält das Sprechgehäuse Fig. 15 eine Scheibe mit 10 Fingerlöchern. Um eine bestimmte Zahl von Stromstößen zu entsenden, setzt man den Zeigefinger in das diese Zahl tragende Loch ein, dreht die Scheibe im Sinne des Uhrzeigers bis zu dem Anschlag und läßt sie dann los. Um den Anschluß z. B. mit 4163 herzustellen, wiederholt man die beschriebene Operation viermal mit dem Einsetzen bezüglich in die Löcher 4, 1, 6, 3.

Die höchste Zahl von Kontakten, die ein einzelner Schalter für sich erreichen kann, ist nach dem erwähnten 100 bei einem Leitungswähler; diese Kontakte entsprechen den Klinken des Vielfachfeldes eines Handumschalters, deren Zahl aber bis zu 10 000 beträgt. Hieraus geht bei zahlreichen Anschlüssen die Notwendigkeit der vorerwähnten Vorwähler und Gruppenwähler hervor, die aus einer großen Zahl von Anschlüssen eine bestimmte Hundertergruppe auswählen müssen, ehe der Leitungswähler die Zehner und Einer darin aussucht.

Erfahrungsmäßig steht fest, daß nicht mehr als 10 unter 100 Verbindungen gleichzeitig verlangt werden. Man braucht also auch für je 100 Teilnehmer nur 10 dieser Leitungswähler sozusagen als Vielfachfeld und hat nur dafür zu sorgen, daß jedem Teilnehmer der Zugang zu jedem dieser Wähler möglich ist. Dies wird durch die Vorwähler erreicht. Jeder Teilnehmer erhält einen solchen Vorwähler. Alle Kontakte Nr. 1 der 100 Vorwähler einer Hundertergruppe sind durch eine gemeinsame Leitung verbunden, die zu einem Leitungswähler führt, ebenso die hundert Kontakte Nr. 2 der Vorwähler durch eine gemeinsame Leitung zum zweiten Leitungswähler und so fort bis zu den 10. Kontakten der Vorwähler. Wenn der Teilnehmer eines Systems für 100 Anschlüsse seine Schaltscheibe zum ersten Mal um die Zahl der Zehner des gewünschten Teilnehmers, nehmen wir an 65, dreht, so hat ihn sein Vorwähler schon mit einem freien unter den 10 Leitungswählern verbunden, und beim Zurückgehen der Schaltscheibe steigt dieser dann schrittweise, bis er mit den Kontakten der siebenten Horizontalreihe, 60 bis 69, in gleicher Höhe steht; gibt der Teilnehmer darauf die Zahl 5, so geht der Schalter vor die Zahl 65. Wenn der Hebel des Prüfers die Feder 65 frei findet, werden die Leitungskontakte geschlossen.

Bei mehr als 100 Anschlüssen sind mehrere derartige Hundertersysteme aufzustellen, die aber auch untereinander verbunden werden müssen. Es sind dazu also neue Wähler nötig,

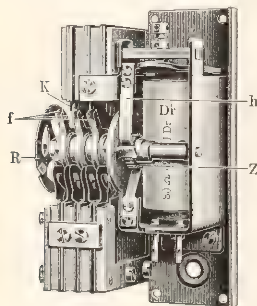


Fig. 13. Vorwähler.

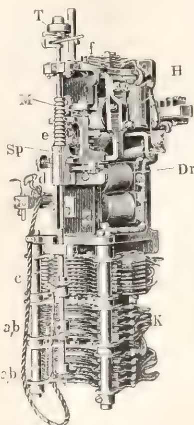
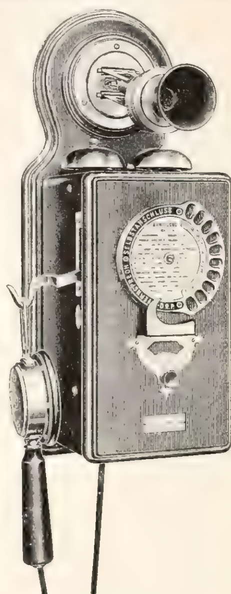


Fig. 14. Leitungswähler.


Fig. 15. Teilnehmerapparat mit Schaltscheibe.

die Gruppenwähler genannt werden und dazu dienen, vorweg eine bestimmte Hundertergruppe zu wählen, ehe in dieser die Schaltung auf die gewünschten Zehner und Einer ausgeführt wird. Sobald die Zahl der Anschlüsse 1000 übersteigt, sind neue Gruppen von je 10 Hunderten zu bilden und Gruppenwähler aufzustellen, die eine bestimmte Tausendergruppe wählen, aus der dann die gewünschte Hundertergruppe ausgewählt wird, in der schließlich der Leitungsschalter die Zehner und Einer aussucht.

Um diese verwickelten Verhältnisse darzustellen, bedienen wir uns einer von Raps erfundenen Kurzschrift der Zeichnung, die aus folgenden Elementen aufgebaut ist (Fig. 16). Es sollen bedeuten

○ 100 Teilnehmerapparate

10 Leitungsgruppen

100 „

100 Vorwähler

10 Gruppen- oder Leitungswähler

Fig. 16. Abgekürzte Bezeichnungen.

In dieser Art wird ein System von hundert Teilnehmern durch Figur 17 dargestellt, die folgendes besagt. Von den 100 Teilnehmer-



Fig. 17. Hundertersystem.

stellen führen 100 Leitungsgruppen, die in Abzweigung über 10 Leitungswähler vielfach geführt sind, zu 100 Vorwählern, an welche

β) Schaltung eines selbsttätigen Amtes. In dieser Darstellung erhält man für ein Tausendersystem, unter Beschränkung auf die beiden ersten und das letzte Hundert das Bild Figur 19. An die hundert Vorwähler V jeder Gruppe von 100 Teilnehmern sind je 10 Gruppenwähler G angeschlossen. Will also beispielsweise Teilnehmer 256 den Teilnehmer 931 rufen, so setzt sich mit dem Abnehmen des Hörers der 56. Vorwähler im zweiten Hundert in Bewegung, und sucht aus den ihm zugänglichen 10 Gruppenwählern einen freien heraus. Beim Zurückgehen der Schaltscheibe Figur 15 gehen dem gewählten Gruppenwähler 10 Stöße zu, die seine Schalt-

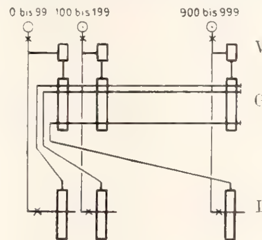


Fig. 19. Tausendersystem.

arme auf die Höhe der Kontakte der zehnten wagerechten Reihe bringen, und dann bewegen sich die Arme in dieser Reihe, bis sie eine freie Leitung zu einem der 10 Leitungswähler L der Gruppe 900 bis 999 gefunden haben. Gibt der Teilnehmer dann auf der Schaltscheibe nacheinander die Ziffern 3 und 1, so geht der Leitungswähler auf die gewünschte Stelle.

Mehr als Tausend Teilnehmer werden in Gruppen zu 1000 eingeteilt. Figur 20 zeigt ein System für 10 000 Teilnehmer unter Abkürzung der Darstellung auf jeweils die

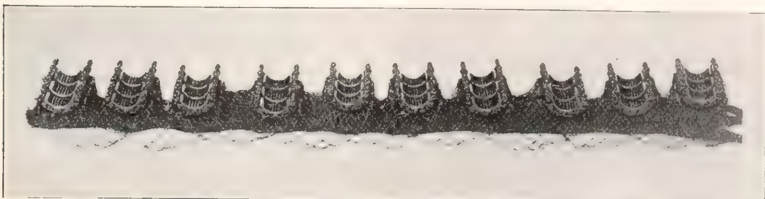


Fig. 18. Kontaktsätze von 10 Leitungswählern.

die 10 Leitungswähler vielfach angeschaltet sind. Figur 18 gibt ein Bild, wie die Kontaktsätze der 10 Leitungswähler mit den vielfach geschalteten 100 Leitungen aussehen.

erste, die zweite und die 10. Einheit. Gegen das Tausendersystem unterscheidet es sich durch die Hinzufügung der zweiten Gruppenwähler G 2.

Man beginnt die Betrachtung am einfachsten bei den Leitungswählern L, die zu je 10×10 eine Gruppe für jeden Tausender bilden und gerade so mit je 100 zweiten Gruppenwählern G2 verbunden sind, wie im Tausendersystem mit den dort allein vorhandenen ersten Gruppenwählern. Während diese dort zu je 10 auf 100 Vorwähler verteilt sind, liegen die ersten 10 der zweiten Gruppenwähler jedes Tausenders an den 10 Horizontalreihen der ersten Gruppenwähler G 1 für das erste Tausend 0 bis 999, die zweiten 10 der zweiten Gruppenwähler jedes Tausenders an den Horizontalreihen der ersten Gruppenwähler des zweiten Tausends 1000 bis 1999. Die ersten Gruppenwähler sind in derselben Weise wie im Tausendersystem an die Vorwähler angeschlossen. Die Erweiterung der Anlage für ein System bis zu 100000 Teilnehmern ist danach leicht anzugeben.

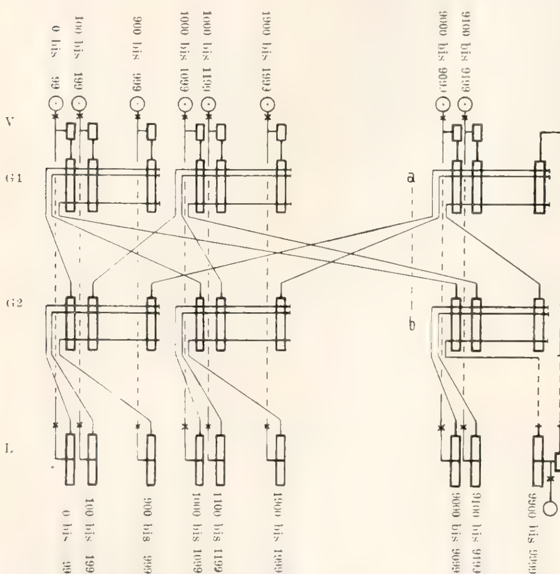


Fig. 20. Schaltung für 10000 Anschlüsse.

Aus der Darstellung des Systems für 10000 Teilnehmer ergibt sich die große Anpassungsfähigkeit der selbsttätigen Umschalter an örtliche Verhältnisse. Man kann offenbar eine Tausendergruppe, z. B. die zehnte in ein anderes Gebäude verlegen, indem man die die gestrichelte Linie a b durchsetzenden Leitungsgruppen verlängert, ohne daß das System als solches geändert wird. Bei einer vollbesetzten Tausendergruppe sind dazu, wie ersichtlich 2×9 Leitungsgruppen zu je 3×10 Drähten, also 540 Drähte erforderlich, die von der Unterzentrale geschlossen zur Hauptzentrale gehen, während die Heranführung der Teilnehmer an die Hauptzentrale 2×1000 Drähte, zum Teil auf verschiedenen Wegen erfordern würde. Man kann ferner einzelne Hundertergruppen abteilen, indem man ihre 100 Vorwähler und die 10 Leitungswähler für sich, etwa in einem Häuserblock aufstellt und zur Zentrale des Tausenders, zu dem die Gruppe gehört, nur die Leitungsgruppen zwischen den Vorwählern und den ersten Gruppenwählern, sowie zwischen den Leitungswählern und den zweiten Gruppenwählern führt. Figur 20 deutet dies für die Gruppe 9900 bis 9999 an. Bei voller Bemessung (10%) würde dies $2 \cdot 10 \cdot 3$ Drähte beanspruchen, während man bei Anschlüssen von Wohnvierteln etwa mit $^1/_3$ bis $^1/_2$ dieser Zahl auskäme.

γ) **Halbautomatische Umschalter.** Neben den im vollen Sinne selbsttätigen Fernsprechämtern gibt es noch halbautomatische, bei denen der Teilnehmer die gewünschte Anschlußnummer einer Beamtin mitteilt, die sie dann durch Niederdrücken eines Satzes von Zahlentasten mit einem Male an eine automatische Schaltvorrichtung weitergibt. In betreff dieser Anordnungen und derjenigen für Fernverkehr, der auch die Mitwirkung einer Beamtin erfordert, wird auf die Literatur verwiesen.

C. Theorie der Fernsprechverbindungen.

Die Theorie der Fernsprechverbindungen kann unter dem Gesichtspunkt betrachtet werden, daß in dem die Leitung enthaltenden Kreis eine andauernde Sinusschwingung unterhalten werde, da einerseits die einzelnen Komponenten einer zusammen-

gesetzten Schwingung sich unabhängig voneinander fortpflanzen, andererseits die Dauer, während deren eine Komponente mit bestimmter Tonhöhe gesprochen oder gesungen wird, genügend groß ist, daß sich die Verhältnisse einer andauernden Schwingung auf der Leitung für genügende Zeit ausbilden.

1. Leitungsgleichungen. In einigermaßen übersichtlicher Form läßt sich die Theorie nur unter Benutzung der dem Vektordiagramm andauernder Wechselströme gleichwertigen komplexen Rechnung darstellen. Man gibt darin einer Wechselstromgröße der Kreisfrequenz ω die Form $Ae^{i\vartheta}e^{i\omega t} = \mathfrak{A}e^{i\omega t}$, wo $i = \sqrt{-1}$. Der Faktor von i darin, oder $A\sin(\omega t+\vartheta)$ stellt eine Sinusschwingung dar, deren Scheitelwert A ist, und die gegen eine bestimmte andere, als Ausgang dienende, die Phasendifferenz ϑ hat. Ein Zeichen wie $\mathfrak{A}$ bedeutet demnach unter Verzicht auf ausdrückliche Darstellung eine Größe bestimmten Scheitelwerts und bestimmter Phase. Nimmt man also an, daß an der Stelle x der Leitung die Spannung den Wert $\mathfrak{V}e^{i\omega t}$, der Strom den Wert $\mathfrak{J}e^{i\omega t}$ habe, so gehen die unter „Telegraphie" bei C erwähnten Grundgleichungen über in

$$-\frac{\partial\mathfrak{V}}{\partial x} = \mathfrak{J}(R + i\omega L), \quad -\frac{\partial\mathfrak{J}}{\partial x} = \mathfrak{V}(A + i\omega C).$$

Wir geben nachstehend die Integrale dieser Gleichungen an, in denen folgende Abkürzungen und Definitionen angewandt sind

$$\gamma = \sqrt{(R + i\omega L)(A + i\omega C)}, \quad \mathfrak{Z} = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{A + i\omega C}}$$

$$\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} = \cos i\gamma x,$$

$$\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} = -i\sin i\gamma x,$$

und die willkürliche Konstanten $\mathfrak{V}'_a$ und $\mathfrak{J}'_a$ von der Bedeutung enthalten, daß am Anfang der Leitung $\mathfrak{V} = \mathfrak{V}'_a$ und $\mathfrak{J} = \mathfrak{J}'_a$ ist.

Diese Integrale sind:

$$\mathfrak{V} = \mathfrak{V}'_a\cos i\gamma x + i\mathfrak{Z}\mathfrak{J}'_a\sin i\gamma x$$

$$\mathfrak{J} = \mathfrak{J}'_a\cos i\gamma x + i\frac{\mathfrak{V}'_a}{\mathfrak{Z}}\sin i\gamma x$$

Aus diesen Gleichungen kann der Verlauf der Schwingung in stehenden Wellen (Spiralendiagramm) hergeleitet werden. Für die Anwendung ist die Beziehung zwischen den Spannungen und den Stromstärken am Anfange ($x = 0$) und am Ende ($x = l$) der Leitung besonders wichtig. Sind letztere $\mathfrak{V}'_e$ und $\mathfrak{J}'_e$, so kann man mit den Abkürzungen

$$\mathfrak{A}' = \cos i\gamma l, \quad \mathfrak{B}' = -i\mathfrak{Z}\sin i\gamma l, \quad \mathfrak{C}' = -\frac{i}{\mathfrak{Z}}\sin i\gamma l,$$

$$\text{wo } \mathfrak{A}'^2 - \mathfrak{B}'\mathfrak{C}' = 1,$$

die Gleichungen in der Form schreiben

$$\mathfrak{V}'_e = \mathfrak{A}'\mathfrak{V}'_a - \mathfrak{B}'\mathfrak{J}'_a \qquad \mathfrak{V}'_a = \mathfrak{A}'\mathfrak{V}'_e + \mathfrak{B}'\mathfrak{J}'_e$$

oder

$$\mathfrak{J}'_e = \mathfrak{A}'\mathfrak{J}'_a - \mathfrak{C}'\mathfrak{V}'_a \qquad \mathfrak{J}'_a = \mathfrak{A}'\mathfrak{J}'_e + \mathfrak{C}'\mathfrak{V}'_e$$

Setzt man mehrere homogene Leitungen so aneinander, daß an den Stoßstellen die Spannungen und Ströme stetig ineinander übergehen, und stellt die Beziehungen zwischen den Spannungen und Strömen am Anfange der zusammengesetzten Leitung und denen am Ende fest, so enthalten die notwendig linearen Gleichungen

$$\mathfrak{V}_a = \mathfrak{A}_1\mathfrak{V}_e + \mathfrak{B}\mathfrak{J}_e$$
$$\mathfrak{J}_a = \mathfrak{A}_2\mathfrak{J}_e + \mathfrak{C}\mathfrak{V}_e$$

zwischen den Koeffizienten eine Bindung $\mathfrak{A}_1\mathfrak{A}_2 - \mathfrak{B}\mathfrak{C} = 1$. Daher folgt auch das Gleichungssystem.

$$\mathfrak{V}_e = \mathfrak{A}_2\mathfrak{V}_a - \mathfrak{B}\mathfrak{J}_a, \qquad \mathfrak{J}_e = \mathfrak{A}_1\mathfrak{J}_a - \mathfrak{C}\mathfrak{V}_a$$

Ist eine beliebig zusammengesetzte Leitung zu ihrer Mitte symmetrisch, so wird $\mathfrak{A}_1 = \mathfrak{A}_2$. Jede derartige Leitung kann also für eine bestimmte Frequenz durch eine homogene ersetzt werden.

Wir wollen annehmen, daß an die Leitung Apparate geschaltet werden, die jeder eine EMK der untersuchten Frequenz, $\mathfrak{E}_a$ und $\mathfrak{E}_e$ enthalten und die Scheinwiderstände $\mathfrak{R}_a$ und $\mathfrak{R}_e$ besitzen. Mit Rücksicht darauf, daß ein von $x = 0$ nach $x = l$ fließender Strom als positiv gilt, ist

$$\mathfrak{V}_a = \mathfrak{E}_a - \mathfrak{R}_a\mathfrak{J}_a, \quad \mathfrak{V}_e = \mathfrak{E}_e + \mathfrak{R}_e\mathfrak{J}_e.$$

Macht man nun zunächst $\mathfrak{E}_a = \mathfrak{E}$, $\mathfrak{E}_e = 0$, so ergibt sich

$$\mathfrak{E} = \mathfrak{J}_e(\mathfrak{A}_1\mathfrak{R}_e + \mathfrak{A}_2\mathfrak{R}_a + \mathfrak{B} + \mathfrak{C}\mathfrak{R}_a\mathfrak{R}_e);$$

Wenn dagegen $\mathfrak{E}_a = 0$, $\mathfrak{E}_e = \mathfrak{E}$, so wird

$$\mathfrak{E} = -\mathfrak{J}_a(\mathfrak{A}_1\mathfrak{R}_e + \mathfrak{A}_2\mathfrak{R}_a + \mathfrak{B} + \mathfrak{C}\mathfrak{R}_a\mathfrak{R}_e).$$

Wenn, wie meistens, die Apparate $\mathfrak{R}_a$ und $\mathfrak{R}_e$ gleichartig sind, so hängt also die Uebertragung der Wechselströme von dem Sender auf den Empfänger nicht davon ab, in welcher Richtung sie erfolgt; besteht z. B. die Leitung aus einer Freileitung und einem Kabel, so ist die Uebertragung eines Wechselstroms bei gegebener EMK auf beiden Seiten dieselbe.

Nehmen wir eine homogene Leitung an ($\mathfrak{A}_1 = \mathfrak{A}_2 = \mathfrak{A}$), so kann diese außer durch die Koeffizienten $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$ durch den Leerlaufwiderstand

$$\mathfrak{U}_1 = \left(\frac{\mathfrak{V}_a}{\mathfrak{J}_a}\right)_{\mathfrak{J}_e = 0} = \frac{\mathfrak{A}}{\mathfrak{C}}$$

und den Kurzschlußwiderstand

$$\mathfrak{U}_2 = \left(\frac{\mathfrak{V}_a}{\mathfrak{J}_a}\right)_{\mathfrak{V}_e = 0} = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{A}}$$

definiert werden. Führt man diese Größen in die für eine homogene Leitung umgeformte Gleichung zwischen $\mathfrak{E}$ und $\mathfrak{J}_e$ ein, so lautet diese

$$\mathfrak{E} = \mathfrak{A}\mathfrak{J}_e\left(\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_e + \mathfrak{U}_2 + \frac{\mathfrak{R}_a\mathfrak{R}_e}{\mathfrak{U}_1}\right)$$

wo $\mathfrak{A} = \sqrt{\frac{\mathfrak{U}_1}{\mathfrak{U}_1 - \mathfrak{U}_2}}$ ist, indessen in der Bedeutung $\mathfrak{A} = \cos i\gamma l$ festgehalten werden soll.

Geht man auf die Definition der Größen $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$ durch γ und $\mathfrak{Z}$ zurück, so findet man, daß für erhebliche Werte von γl die beiden Größen $\mathfrak{U}_1$ und $\mathfrak{U}_2$ sich dem Wert $\mathfrak{Z}$ annähern, während $\mathfrak{A}$ im wesentlichen gleich $\frac{1}{2}e^{\gamma l}$ wird. So erhält man für eine lange Leitung mit gleichen Apparaten vom Scheinwiderstand $\mathfrak{R}$

$$\mathfrak{E} = \frac{1}{2} e^{\gamma l} \mathfrak{J}_e \frac{(\mathfrak{R} + \mathfrak{Z})^2}{\mathfrak{Z}}$$

2. Charakteristik und Fortpflanzungskonstante. $\mathfrak{Z}$ heißt die Charakteristik der Leitung, γ ihre Fortpflanzungskonstante. Die Charakteristik ist von Bedeutung für die Reflexionen, die an Stoßstellen zweier verschiedener Leitungen auftreten und für die Anpassung der Apparate an die Leitung. Man erkennt, daß zwei Leitungen gleicher Charakteristik hinsichtlich der Güte der Uebertragung nach den Werten von γl zu beurteilen sind. Nun kann $\gamma = \alpha i + \beta$ gesetzt werden; $e^{i\alpha l}$ bedeutet eine bestimmte Phasenbeziehung zwischen $\mathfrak{E}$ und $\mathfrak{J}_e$, während βl das Maß der Stromschwächung angibt.

αl heißt Winkelmaß, βl Dämpfungsexponent, β die Dämpfungskonstante oder spezifische Dämpfung der Leitung. Die Werte von α und β ergeben sich aus

$$\alpha^2 = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{(\omega^2 C^2 + A^2)(\omega^2 L^2 + R^2)} + (\omega^2 CL - AR)\right\}$$

$$\beta^2 = \frac{1}{2}\left\{\sqrt{(\omega^2 C^2 + A^2)(\omega^2 L^2 + R^2)} - (\omega^2 CL - AR)\right\}$$

Für verschiedene Arten von Leitungen lassen sich hieraus Näherungsformeln ableiten. Für solche Leitungen, bei denen ωL groß gegen R ist, — die Bedingung, daß ωC gegen A groß sei, ist bei ordnungsmäßigen Leitungen stets erfüllt —, ergeben sich die Näherungen.

$$\alpha = \omega\sqrt{CL}$$

$$\beta = \frac{1}{2} R \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{1}{2} A \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Hierzu rechnen die starkdrähtigen Freileitungen und die mit erhöhter Induktivität ausgerüsteten Kabel.

Bei gewöhnlichen Kabeln dagegen ist R groß gegen ωL und man findet die Näherungsformeln

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega CR}{2}}$$

Leitungen der ersten Art dämpfen Töne aller Frequenzen in demselben Maße, solche der zweiten Art lassen höhere Töne weniger gut durch als geringere. Dies macht sich in der Klangfarbe der Sprache geltend

3. Güte der Verständigung. Durch Versuche hat man in verschiedenen Ländern festgestellt, daß die Verständigung mit dem Fernsprecher im wesentlichen davon abhängt, mit welcher Stärke ein Ton von der Kreisfrequenz $\omega = 5000$ (rund 800 Per/sek) übertragen wird. Auf Grund dieser Versuche hat eine Tabelle über den Zusammenhang zwischen Dämpfungsexponent und Verständigung allgemeine Annahme gefunden, die lautet:

Dämpfungsexponent	Verständigung
3,0	Gut
3,8	Ausreichend
4,3	Dürftig
4,8	Kaum möglich

Diese Zahlen gelten für die gesamten Leitungsverbindungen zwischen zwei Fernsprechapparaten. Es werden natürlich gute normale Apparate vorausgesetzt. Mäßige Aenderungen in der Leistungsfähigkeit des Mikrophons oder der Empfindlichkeit des Fernhörers beeinflussen die obigen Zahlen nur wenig, da dem Dämpfungsexponenten gegenüber nur ihr Logarithmus in Frage kommt. Aus demselben Grunde macht aber auch eine Verbesserung der Apparate um einige 20 bis 30% fast nichts aus.

Wenn die Aufgabe gestellt wird, zwischen zwei bestimmten Orten eine Fernsprechverbindung zu schaffen, so wird man auf Grund der Entfernung und unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse, nämlich der durchschnittlichen Länge der Anschlußleitungen in den Endorten, der Zahl der in der Leitung liegenden Amtseinrichtungen und dergleichen aus einer der angegebenen Zahlen für ein zur gewünschten Verständigung ausreichendes βl zu einem Wert für β kommen, nach dem man die Art der Verbindungsleitung zu wählen hat. Je niedriger dieser Wert von β, um so mehr ist man in der Wahl der natürlichen Leitungen, die genügen, beschränkt, und so entsteht die Frage, auf welche Weise man die Dämpfungskonstante einer Leitung vermindern kann.

4. Leitungen mit erhöhter Induktivität. β wächst mit C, R und A und nimmt mit L ab. Eine Verbesserung des β durch Verkleinerung von C, R und A bedingt Aufwand von mehr und von hochwertigem Material, also große Kosten. Man ist bei oberirdischen Leitungen bei 5 mm starken Drähten an der Grenze, wie die Tabelle erkennen läßt.

Drahtstärke in mm	3,0	4,0	4,5	5,0
$10^4\,\beta$	46,5	30,0	25,4	22,0

Kabel werden bei Drähten über 3 mm Stärke zu sperrig. Vorteilhaft kann aber β durch Vergrößerung der Induktivität vermindert werden. Man hat in der Praxis zwei Verfahren angewandt.

4a) Krarup erhöht die Induktivität jedes Stückes der Leitung, indem er jeden Leitungsdraht mit feinem Eisendraht von 0,2 bis 0,3 mm Durchmesser in engen Windungen bewickelt. Da das Eisen geschützt bleiben muß, eignet sich diese Anordnung nur für Kabel, und da man nur etwa 0,001 H/km

erzielt, mit rechtem Erfolge nur für stärkere Querschnitte. Immerhin ist ein Krarupkabel mit 1,2 mm starken Kupferdrähten einem gewöhnlichen mit 2,0 mm starken Drähten elektrisch gleichwertig, aber billiger.

4 b) Pupin hat die Anregung Heavisides, die erforderliche Induktivität nicht gleichmäßig, sondern in Form von Spulen über die Leitung zu verteilen, näher verfolgt. Auf der von ihm angegebenen Verteilungsart beruhen die großen Verbesserungen der Fernsprechleitungen, besonders der Kabel, die in den letzten Jahren erzielt worden sind.

α) Theorie der Pupinleitungen. Figur 21 stellt ein Stück einer solchen Leitung dar. Die einzelnen Leitungsstücke von der Länge s sind durch die Konstanten $\mathfrak{A}'$, $\mathfrak{B}'$, $\mathfrak{C}'$ bestimmt, die Spulen haben den Scheinwiderstand $\mathfrak{W} = (\varrho + i\omega\lambda)s$. Unter den angegebenen Bezeichnungen ergibt sich aus den drei Gleichungen

$$\mathfrak{J}_{m-1} = \mathfrak{A}'\mathfrak{J}_m + \mathfrak{C}'\mathfrak{B}_m,$$
$$\mathfrak{J}_{m+1} = \mathfrak{A}'\mathfrak{J}_m - \mathfrak{C}'\mathfrak{B}_{m+1}$$
$$\mathfrak{B}_m - \mathfrak{B}_{m+1} = \mathfrak{W}\mathfrak{J}_{m+1}$$

die Beziehung

$$\mathfrak{J}_{m-1} - (2\mathfrak{A}' + \mathfrak{C}'\mathfrak{W})\mathfrak{J}_m + \mathfrak{J}_{m+1} = 0;$$

sie wird durch den Ansatz erfüllt

$$\mathfrak{J}_m = \mathfrak{G}_1 \cos m i\vartheta s + \mathfrak{G}_2 \sin m i\vartheta s,$$

wo $\mathfrak{G}_1$ und $\mathfrak{G}_2$ Konstante sind, die durch die Schaltungen am Ende der Leitung, also unabhängig von m zu bestimmen sind. Der Ansatz führt zu der Gleichung

$$\cos i\vartheta s = \mathfrak{A}' + \mathfrak{C}'\frac{\mathfrak{W}}{2}.$$

Dadurch wird für die Pupinleitung eine Größe ϑ bestimmt, welche der Fortpflanzungskonstante einer homogenen Leitung im Wesen gleich ist. Drückt man $\mathfrak{A}'$ und $\mathfrak{C}'$ durch die für die Leitungsstücke geltenden γ und $\mathfrak{Z}$ aus, so folgt

$$-4\sin^2\frac{i\vartheta s}{2} = -4\sin^2\frac{i\gamma s}{2} - \frac{\mathfrak{W}}{\mathfrak{Z}}\, i \sin i\gamma s.$$

Diese allgemeine, für jede Leitungslänge und Spulengröße geltenden Gleichungen wendet Pupin nunmehr nur auf Spulenabstände an, für welche $\sin {}^1/_2\, i\gamma s$ durch ${}^1/_2\, i\gamma s$ innerhalb eines festzusetzenden Fehlers ersetzt werden kann. Berücksichtigt man dies und führt für γ seinen Wert ein, so folgt

$$-4\sin^2\frac{i\vartheta s}{2} = (A + i\omega C)s\,((R + i\omega L)s + \mathfrak{W}).$$

Die rechte Seite stellt das Quadrat der Fortpflanzungskonstante γ_1, multipliziert mit s^2 dar für eine Leitung, die in der Länge s gerade dieselben Beträge an Ableitung, Kapazität, Widerstand und Induktivität enthält, wie die zusammengesetzte Leitung. Wenn man $\mathfrak{W}$ so wählt, daß $\sin\frac{i\gamma_1 s}{2}$ und $\frac{i\gamma_1 s}{2}$, innerhalb der gesetzten Grenzen als gleich betrachtet werden können, so ist

$$\vartheta = \gamma_1.$$

Die Fortpflanzungskonstante der Pupinleitung stimmt also mit derjenigen einer die gleichen elektrischen Eigenschaften besitzenden homogenen Leitung in demselben Grade überein wie $\frac{i\gamma_1 s}{2}$ mit $\sin\frac{i\gamma_1 s}{2}$. Wie groß die Uebereinstimmung gemacht werden muß, um eine praktisch gleichwertige Uebertragung zu erzielen, ist eine Frage des Versuchs. γ_1 zerfällt ähnlich wie γ in $\alpha_1 i + \beta_1$, worin $\alpha_1 = \omega\sqrt{C(L + \lambda)}$ bei weitem die Größe

$$\beta_1 = \frac{R + \varrho}{2}\sqrt{\frac{C}{L + \lambda}} + \frac{A}{2}\sqrt{\frac{L + \lambda}{C}}.$$

übertrifft. Daher kommt die geforderte Beziehung darauf hinaus, daß $\frac{\alpha_1 s}{2}$ und $\sin\frac{\alpha_1 s}{2}$ einander nahezu gleich sein sollen.

Durch Versuche hat sich ergeben, daß Anordnungen, bei denen

$$7500\sqrt{C(L + \lambda)}\,s \leq 1$$

ist, eine gute Uebertragung der Sprache ergeben. Wählt man den Zahlenfaktor höher als 7500, so wird die Uebertragung dem Klange nach, namentlich in den höheren Stimmlagen noch etwas besser, wählt man ihn merklich niedriger, z. B. 6000, so wird die Sprache stark verzerrt.

Die günstigste Art der Pupinisierung ergibt sich aus den Eigenschaften R, L, A, C der natürlichen Leitung und der Zeitkonstante $\tau = \lambda/\varrho$ der Spulen. Man berechnet daraus zuerst die günstigste Charakteristik

$$Z = \sqrt{(R - L/\tau)/(A + K/\tau)},$$

und erhält damit für die günstigste Induktivität jeder Spule den Wert $\lambda s = Z/7500$, für den Spulenabstand der Wert $s = 1/7500\ CZ$. Darin ist 7500 der oben benutzte Zahlenfaktor, der physikalisch als die halbe Eigenfrequenz eines Elements der Pupinleitung aufgefaßt werden kann.

β) Ausführung von Pupinleitungen. Bei der Ausführung der Pupinisierung hat es sich gezeigt, daß besonderes Gewicht auf Gleichheit der Induktivität in beiden Zweigen zu legen ist, weil sonst Uebersprechen zwischen den Leitungen eintritt. Man wickelt daher beide Wicklungen so auf den Eisenkern, daß ihre magnetischen Wirkungen möglichst genau gleich sind.

Das Pupinsystem ist zuerst in Nord-

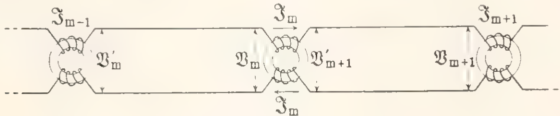


Fig. 21. Pupinleitung.

amerika bei Freileitungen in großem Maße angewandt worden; zurzeit geht man in Deutschland damit kräftig vor. Ein Beispiel einer neueren Leitung ist die 1300 km lange Hartkupferdrahtleitung der geplanten Fernsprechleitung Berlin—Mailand. Der Kupferdraht hat 4,5 mm Durchmesser. In Abständen von 10 km sind Spulen mit 0,2 H eingeschaltet; die erreichte Dämpfungskonstante ist etwa 0,0012 gegen 0,0025 bei der natürlichen Leitung.

Neuerdings führt man die Fernleitungen in den großen Städten als Kabel, oder man legt auch eigentliche Fernkabel nach dem Pupinsystem.

In den Vereinigten Staaten ist 1910 ein 764 km langes Fernkabel Boston-New York-Washington verlegt worden, das 74 Doppelleitungen enthält, darunter 14 aus 2,6 mm starken Drähten. Zurzeit hat die Deutsche Telegraphenverwaltung die Legung eines Kabels begonnen, das nach der Vollendung Berlin mit Cöln verbinden soll; es enthält 24 Doppelleitungen mit 3 mm starken Drähten und 28 mit Drähten von 2 mm Stärke. Die Dämpfungskonstanten sind etwa 0,0031 und 0,0045, und diese Zahlen sind niedriger als die für Freileitungen gleicher Stärke. Diese Fernkabel und auch die genannten Einführungskabel unterscheiden sich von den gewöhnlichen Doppelleitungskabeln durch den Aufbau aus Adervierern. Zunächst werden je zwei Adern zu Doppelleitungen verseilt, dann zwei Doppelleitungen zu einem Vierer, und aus solchen wird das Kabel aufgebaut. Infolge der Verseilung je zweier Doppelleitungen zu einem Vierer läßt sich jedes Paar von Doppelleitungen zu einer Viererleitung kombinieren, derart, daß auch diese gegen alle anderen Vierer und alle Doppelleitungen der anderen Vierer störungsfrei ist. Störungen zwischen solchen nicht leitend zusammenhängenden Kreisen werden als Uebersprechen bezeichnet. Von der Symmetrie im Aufbau des Vierers hängt es ab, ob zwischen den Stammleitungen und dem Vierer keine Störungen, als Mitsprechen bezeichnet, auftreten.

Bei den Einführungskabeln ist die Viererverseilung notwendig, weil zahlreiche oberirdische Fernlinien schon zu Viererleitungen kombiniert sind, bei den Fernkabeln wählt man sie, um aus je zwei Doppelleitungen drei Sprechkreise bilden zu können.

Um solche Viererleitungen zu pupinisieren, hat man an jedem einzelnen oder an jedem zweiten Spulenpunkt außer den Spulen für die Stammleitungen noch eine Spule für die Viererleitung anzubringen. Das Schema zeigt Figur 22.

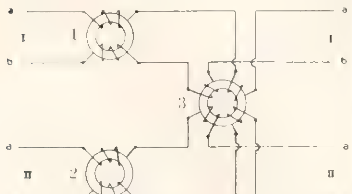


Fig. 22. Pupinisierung einer Viererleitung.

Ströme, die in einer Stammschleife hin und zurück verlaufen, heben ihre magnetisierenden Wirkungen in der Spule 3 auf, während sie sich in den Spulen 1 oder 2 unterstützen; dagegen bilden Ströme, die die Zweige von I als Hinleitung, die von II als Rückleitung durchlaufen, ein Feld nur in 3, während sich die Wirkungen in 1 und 2 aufheben. Vorausgesetzt wird dabei, daß die Wickelungen so über die Kerne der Spulen verteilt sind, daß nirgendwo Pole im Eisen entstehen können.

Literatur. *Allgemeines und Theorie: vgl. die „Literatur" des Artikels „Telegraphie". — Apparate und Schaltungen:* ***K. B. Miller,*** *American Telephon Practice. New York 1905. —* ***Hersen und Hartz,*** *Fernsprechtechnik der Gegenwart. Braunschweig 1910. —* ***Kruckow,*** *Selbstanschluß-Einrichtungen. Braunschweig 1911. —* ***Berger.*** *Gleichzeitiges Telegraphieren und Fernsprechen. Braunschweig 1910. — Die laufende Literatur ist bis 1911 vierteljährlich in den Fortschritten der Elektrotechnik, Abschnitt X, zusammengestellt.*

F. Breisig.

Terpene.

1. Vorkommen der Terpene. 2. Gewinnungs- und Trennungsmethoden. 3. Einteilung der Terpene und Campher in A) olefinische, B) mono- C) bicyclische und D) Sesquiterpene und Polyterpene. 4. Einteilung der Gruppen A bis C: I. $C_{10}H_{16}$, $C_{10}H_{16}O$. $C_{10}H_{17}OH$. II. $C_{10}H_{18}$. $C_{10}H_{18}O$. $C_{10}H_{19}OH$. III. $C_{10}H_{20}$. 5. Eigenschaften und Verhalten der Terpene und Terpenketone. 6. Oxydationserscheinungen. 7. Uebergänge von der hydroaromatischen Reihe zur Fettreihe und Benzolreihe und solche in umgekehrter Richtung. 8. Beschreibung der Terpene und Campher gemäß der Einteilung im 4. Abschnitt. 9. Niedere Homologe der Terpene und Campher. 10. Sesqui- und Polyterpene.

1. Vorkommen der Terpene. In den ätherischen Oelen, die aus Blüten, Blättern, Rinden und Wurzeln usw. von Pflanzen, hauptsächlich Koniferen und Citrusarten, gewonnen werden, befinden sich Kohlenwasserstoffe $C_{10}H_{16}$. Diese werden Terpene genannt. Neben ihnen kommen noch Terpen-Alkohole, -Aldehyde, -Ketone, -Oxyde, -Superoxyde vor. Terpenalkohole und Terpenketone der Zusammensetzung $C_{10}H_{16}O$, $C_{10}H_{18}O$ und $C_{10}H_{20}O$ nennt man Campher im weiteren Sinne (nach dem Japancampher $C_{10}H_{16}O$). Von Kohlenwasserstoffen finden sich häufig vor Limonen (Dipenten) Carvestren, Sylvestren, Phellandren, Pinen, Camphen; von Alkoholen: Menthol, Terpineol, Borneol, Geraniol, von Aldehyden: Citronellal, Citral, von Ketonen: Campher, Fenchon, Carvon, Menthon, Thujon. Der Gehalt der Oele an Kohlenwasserstoffen ist um so größer, je geringer die Entwickelung der Pflanzen ist, während der Gehalt an sauerstoffhaltigen Stoffen mit der Reife der Pflanzen wächst.

2. Gewinnungs- und Trennungsmethoden. Die Gewinnung der Stoffe aus

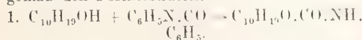
den Pflanzen geschieht folgendermaßen (vgl. den Artikel „Riechstoffe“):

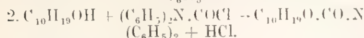
1. Die bei der Destillation der Stengel. Kräuter, Samen, Blüten mit Wasserdampf übergegangenen Oele werden abgehoben oder ausgeäthert, getrocknet und der fraktionierten Destillation unterworfen: Die Kohlenwasserstoffe gehen zwischen 140 und 190°, die Alkohole und Ketone zwischen 190 und 235° über.

2. Aus den Pflanzenteilen zieht man mit Lösungsmitteln wie Aether, Petroläther, Tetrachlorkohlenstoff, Aceton die Oele heraus, verdunstet die Extraktionsmittel und fraktioniert im Vakuum.

3. Durch Enfleurage (Südfrankreich, Grasse): man breitet die Blüten auf Flächen, die mit Fetten bestrichen sind, aus. Die Aetherischen Oele bilden mit den Fetten die Pomaden, aus denen mit Wasserdampf die Terpene und Campher übergetrieben werden, während die Fette zurückbleiben. —

Chemische Trennungsmethoden: Aldehyde werden in Bisulfitverbindungen übergeführt; die Ketone verwandelt man in Semicarbazone, die mit Schwefelsäure oder Oxalsäure zerlegt werden, die zurückgewonnenen Ketone werden durch Wasserdampf übergetrieben. $NaHSO_3$ findet zur Pulegon-, H_2S zur Carvonabscheidung Anwendung. Die Alkohole werden mit Phenylisocyanat oder Diphenylcarbaminsäurechlorid gemäß den Formelbildern:


1. $C_{10}H_{19}OH + C_6H_5N.CO \rightarrow C_{10}H_{19}O.CO.NH.C_6H_5.$

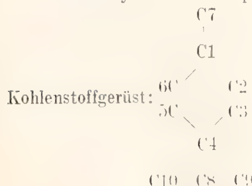

2. $C_{10}H_{19}OH + (C_6H_5)_2N.COCl \rightarrow C_{10}H_{19}O.CO.N(C_6H_5)_2 + HCl.$

umgesetzt und die Urethane der Hydrolyse unterworfen, oder 2. man bildet Ester und destilliert sie heraus, oder 3. man verfährt mit Phtalsäureanhydrid so: In die trockne ätherische Lösung eines Alkohols bringt man Natriumdraht; das Alkoholat und Anhydrid geben $C_6H_4C{<}{COOR \atop COONa}$, das sich in H_2O löst, während im Aether die nicht alkoholischen Stoffe bleiben. Das Estersalz wird mit KOH verseift. Die Kohlenwasserstoffe geben oft kristallisierte Hydrochloride; man muß aber bisweilen die Ketone und Alkohole entfernen, die Kohlenwasserstoffe fraktionieren und mit N_2O_3, N_2O_4, NOCl charakterisieren. Pinen kann über das Pinennitrosochlorid $C_{10}H_{16}NOCl$ gereinigt werden, da in diesem Falle NOCl wieder abgespalten werden kann.

3. Einteilung der Terpene und Campher.

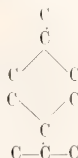
A. Olefinische Terpene mit offener Kohlenstoffkette.

B. Monozyklische Terpene mit dem Kohlenstoffgerüst:

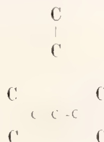


C. Bizyklische Terpene:

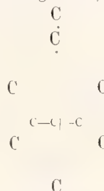
I. Sabinan- oder Tanazetangruppe (intrazyklische T. mit 1,3 Bindung):



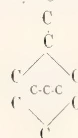
II. Carangruppe (intracarbozyklische T. mit o-ständigem C.):



III. Pinangruppe (intracarbozyklische T. mit m-ständigem C.):



IV. Camphangruppe (intracarbozyklische T. mit p-ständigem C.):



D. Sesquiterpene $C_{15}H_{24}$ und Polyterpene $(C_5H_8)x$.

4. Einteilung der Gruppen A—C.

I. Kohlenwasserstoffe $C_{10}H_{16}$ in A, B, C I, III, IV. (Terpene.)
Ketone $C_{10}H_{16}O$ in A, B, C I—IV.
Alkohole $C_{10}H_{17}OH$ in A, B, C I—IV.
Einige Dialkohole $C_{10}H_{16}{OH \atop OH}$ und Oxyde $C_{10}H_{16}O$ und Peroxyde $C_{10}H_{16}O_2$.

II. Kohlenwasserstoffe $C_{10}H_{18}$ in A, B, C I und IV (Dihydroterpene).
Ketone $C_{10}H_{18}O$ in A. und B.
Alkohole $C_{10}H_{19}OH$ in A. und B.

Einige Dialkohole $C_{10}H_{18}{OH \atop OH}$ und Oxyde $C_{10}H_{18}O$.

III. Kohlenwasserstoffe $C_{10}H_{20}$ in B. (Tetrahydroterpene.)

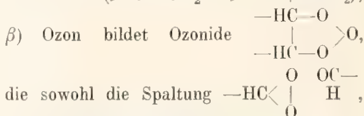
Die scharfe Charakterisierung und die Ermittelung der gegenseitigen Beziehungen der aus vielen Ölen gewonnenen Terpene verdanken wir den grundlegenden Arbeiten O. Wallachs; um die Erforschung der Konstitution, die Synthese u. a. haben sich außer ihm Aschan, v. Baeyer, Bredt, Brühl, Harries, Perkin jr., Semmler, Tiemann, Wagner und viele Männer der Technik große Verdienste erworben.

5. Eigenschaften und Verhalten der Terpene und Terpenketone. a) **Terpene.** In reinem Zustande sind sie farblose, stark lichtbrechende Flüssigkeiten vom Siedepunkt 140—190° mit charakteristischem, oft angenehmem Geruch. Viele sind optisch aktiv in 1 und 2 Modifikationen gefunden worden, Dipenten ist ein racemisches Terpen. Verhalten: 1. Große Fähigkeit, sich zu isomerisieren unter Verschiebung von Aethylen oder Diagonalbindungen: Durch Wärme (Pinen → Dipenten; Terpinolen → Dipenten + Terpinen), durch Mineralsäuren (Pinen, Sabinen, Phellandren in Terpinen) und durch Alkalien (α-Thujon ⇄ β-Thujon. Die Verschiebung von Bindungen findet auch bei den Hydratationsvorgängen statt. Für die Richtung der Isomersiation bestehen die Gesetzmäßigkeiten, daß Kohlenwasserstoffe mit semizyklischer Bindung ($\Delta^{4(8)}$ p-Menthen → Δ^3 p-Menthen) unter dem Einfluß von Säuren die Bindung leicht in den Kern legen, während bei höherer Temperatur die Kohlenwasserstoffe mit semizyklischer Bindung recht stabil sind. 2. Die Terpene zeigen große Neigung zur Polymerisation. 3. Addition von Halogen: Brom gibt z. B. mit Limonen, Dipenten, Terpinolen und Sylvestren Tetrabromide.

Unter Eiskühlung werden 0,7 Vol. Br entweder zu 1 Vol. Terpen in 4 Vol. Alkohol + 4 Vol. Aether oder 1 Teil Terpen + 10 Teile Eisessig getropft. Aether und Essigester sind Kristallisationsmittel. 4. Addition von Cl—N=O (Nitrosylchlorid) (siehe den Artikel „Nitrosoverbindungen"): 50 Terpen, 50 Eisessig + 50 Aethylnitrit werden in Kältemischung nach und nach mit 15 ccm roher 33% HCl versetzt. Pinennitrosochlorid z. B. kommt großkristallinisch heraus, wird abgesaugt, mit Alkohol nachgewaschen und aus Aceton umkristallisiert. —CH=CH— → —ClHC—CHNO— → —ClHC—C(=NOH) — Beim Ersatz des Cl durch Basenreste entstehen Nitrolamine.

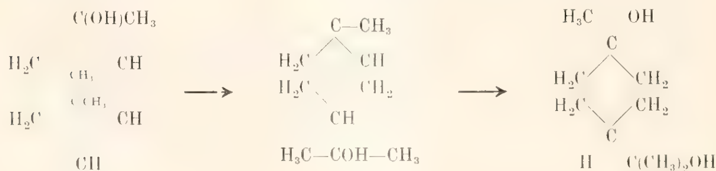
5. Addition von ClH, BrH, JH. Es wurde festgestellt, daß trockener ClH aus Verbindungen $C_{10}H_{16}$ wie Limonen und Pinen Additionsprodukte $C_{10}H_{16}$1HCl bildet, daß aber bei Gegenwart von Feuchtigkeit Additionsprodukte $C_{10}H_{16}$.2HCl entstehen. Pinen wird dabei in Dipenten umgelagert. 2 Mol. Halogenwasserstoff addieren sich leicht, wenn man eine möglichst gesättigte Auflösung von ClH, BrH, JH in Eisessig zu dem in Eisessig gelösten Kohlenwasserstoff im Ueberschuß hinzufügt und durch Eingießen der Flüssigkeit in Eiswasser die Additionsprodukte in festem Zustande ausfällt.

6. Addition von O: α) O_2 der Luft spaltet z. B. im β-Phellandren leicht die Methengruppe ab unter Bildung von Isopropyl-4-Δ^2-cyclohexenon—1 (> C=CH_2 → > CO + OCH_2); β) Ozon bildet Ozonide



die sowohl die Spaltung wie daraus abzuleitende Carbonsäuren geben können (s. Citral S. 1062 und Campher S. 1062).

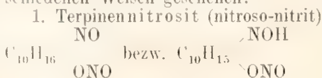
7. Addition von H_2O unter Aufhebung von Aethylen- und Diagonalbindungen. Die Addition geht oft auf Umwegen vor sich: Pinenhydrat gibt cis-Terpin nicht direkt, sondern über das α Terpineol:



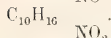
8. Addition von $(OH)_2$: bei der Behandlung der Terpene mit $KMnO_4$ in verdünnter (1%) eiskalter Lösung entstehen unter Anlagerung von 2 OH-Gruppen an die Aethylenbindung mehrwertige Alkohole.

9. Addition von N_2O_3 kann an in Ligroin (auch Eisessig) gelöste Terpene in 2 verschiedenen Weisen geschehen:

1. Terpinennitrosit (nitroso-nitrit)



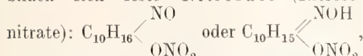
2. Phellandrennitrit (nitroso-nitrokörper)

$C_{10}H_{16}\begin{smallmatrix}NO\\ \\NO_2\end{smallmatrix}$.

In 1 ist die ONO-Gruppe, wie in den Nitrosochloriden das Chlor, durch Basenreste ersetzbar, unter Bildung von Nitrolaminen, 2 gibt bei der Reduktion Diamine.

10. Addition von N_2O_4. Aus gekühlten Terpen, Amylnitrit, Eisessig und HNO_3 bilden sich feste Nitrosate (Nitrosonitrate): $C_{10}H_{16}\begin{smallmatrix}NO\\ONO_2\end{smallmatrix}$ oder $C_{10}H_{15}\begin{smallmatrix}NOH\\ONO_2\end{smallmatrix}$,

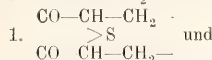


in denen ONO_2 zum Austausch gegen Basenreste unter Bildung von Nitrolaminen befähigt ist.

11. Addition von H_2 nach verschiedenen Methoden; Na + Alkohol, Zn + Eisessig, H_2 + Ni (Sabatier), H_2 + koll. Pd oder Pt (Paal und Skita; Fokin und Willstätter) führen zu Hydroterpenen.

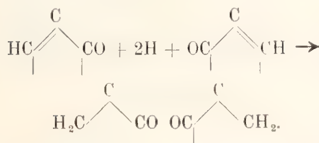
b) **Terpenketone** $C_{10}H_{16}O$ und $C_{10}H_{18}O$.

Soweit diese eine Aethylenbindung aufweisen, treten neben den oben erwähnten Additionsvorgängen bei Verbindungen mit der Gruppierung $-CO-\overset{H}{C}:\overset{H}{C}-$ noch die Addition von H_2S und NH_2OH hinzu:



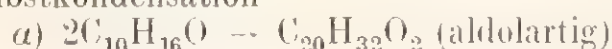
1. $\begin{smallmatrix}CO-CH-CH_2\\ \quad >S\\ CO\quad CH-CH_2-\end{smallmatrix}$ und

2. $-CO-CH_2.CH(NHOH)-$ hinzu. 3. können diese Ketone durch H_2 auch in 1,4 Diketone verwandelt werden

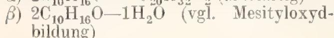


Außerdem ist wie bei den Ketonen der Fettreihe das Verhalten 1. der Carbonylgruppe und 2. der H-Atome in von CO-Gruppen induzierten —CH— und CH_2-Gruppen zu berücksichtigen.

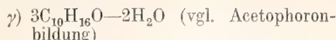
A. Verhalten der —CO-Gruppe: 1. zu Thioalkoholen, führt zu Mercaptalen, die sich zu Sulfonen oxydieren lassen. 2. $NaHSO_3$ addiert sich an manche Ketone, nicht an Menthon, Campher und Fenchon. 3. Hydroxylamin, Phenylhydrazin, Semicarbazid führt zu Oximen, Phenylhydrazonen und Semicarbazonen. 4. sie vermittelt die Verknüpfung von C mit C a) durch Selbstkondensation



α) $2C_{10}H_{16}O \rightarrow C_{20}H_{32}O_2$ (aldolartig)



β) $2C_{10}H_{16}O-1H_2O$ (vgl. Mesityloxydbildung)



γ) $3C_{10}H_{16}O-2H_2O$ (vgl. Acetophoronbildung)



δ) $3C_{10}H_{16}O-3H_2O$ (vgl. Mesitylenbildg).

b) durch Kondensation mit anderen Ketonen $>CO + H_3C-CO.CH_3 \rightarrow >COH.CH_2.CO.CH_3 \rightarrow >C=CH.CO.CH_3$; c) nach Grignard: $>CO + JMgCH_3 \rightarrow >C(OH)CH_3$, d) nach Reformatzky-Saytzeff: $>CO + BrMgCH_2COOR \rightarrow >COH.CH_2.COOR \rightarrow >C.CH_2.COOH$ oder $>C=CH.COOH \rightarrow >C=CH_2$ (Methenverbindungen).

5. durch Aufnahme von H_2 werden Alkohole oder Pinakone gebildet.

B. Verhalten der der CO-Gruppe benachbarten CH- oder CH_2-Gruppen.

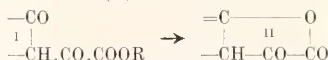
1. Halogen führt zu α-Halogenketonen, die in α-Oxyketone (Ketosen) und deren Abkömmlinge wie Aether, Ester verwandelt werden können.

2. HNO_2 (Alkylnitrit und Säure) führt zu Isonitroso-, oft zu Diisonitrosoverbindungen, —CO—C:NOH— und $CO<(C:NOH-)_2$; Monoisonitrosoketone (Keton-1-oxime-2) und Keto-1-phenylhydrazone-2 —CO—C $(=N-NH.C_6H_5)$ — bilden sich aus den β-Ketocarbonsäuren —CO—CH—COOH— + HNO_2 bezw. $C_6H_5.N_2OH$.

3. HCOOR gibt Oxymethylenketone, die a) als solche oder in Form ihrer Chloride mit Pd + H in α-Methylketone über β-Ketonalkohole reduziert werden können: $-CO-C(:CHOH)- \rightarrow -CO-CH(CH_2OH)- \rightarrow -CO-CH(CH_3)-$, b) mit anderen Reduktionsmitteln 1,3 Glycole, $-CHOH-CH-(CH_2OH)-$, geben.

4. Essigester gibt Acetylketone, 1,3 Diketone, $-CO-CH(-CO-CH_3)-$.

5. Oxalester gibt neben Dioxalestern und Lactonen (II)

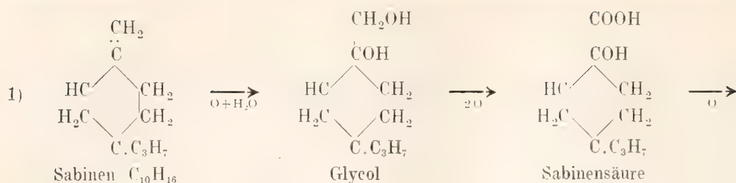


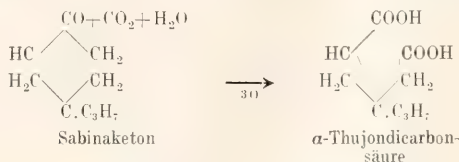
Ketonoxalester (I) die unter CO-Abspaltung in β-Ketoncarbonester $-CO-CH(-COOR)-$ übergehen.

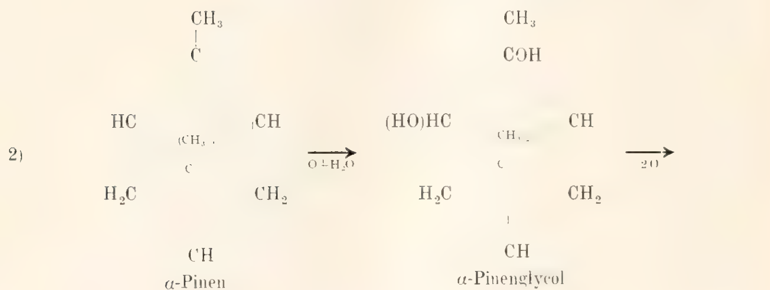
6. Aldehyde und Ketone führen zu Mono- und Dialkyl-Methenketonen $-CO-CH_2- \rightarrow -CO-C(=CHR)-$ oder $-CO-C\left(=C\begin{smallmatrix}CH_3\\CH_3\end{smallmatrix}\right)-$ [und zu $-CH_2-C(=CH.CO.CH_3)-$].

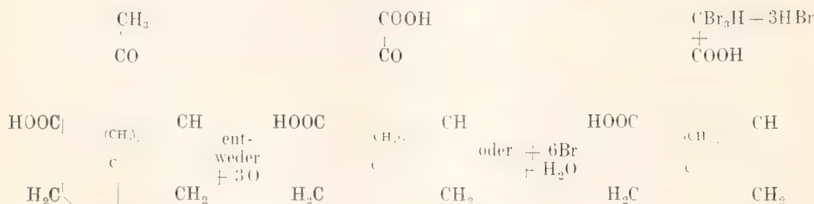
7. Halogenalkyle bilden Mono- oder Polyalkylketone, $-CO-CH(CH_3)-$, $-CO-C(CH_3)_2-$, $CO<(CHCH_3-)_2$ usf.

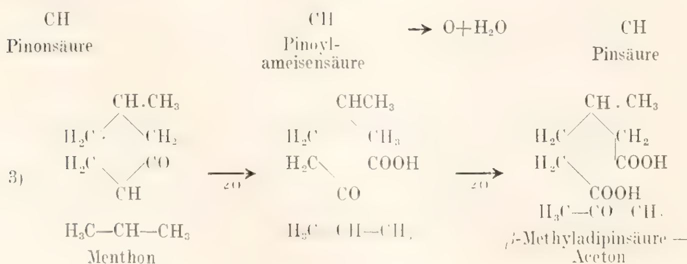
6. Oxydationserscheinungen an Kohlenwasserstoffen und Ketonen. Diese mögen an folgenden Beispielen, die ihren Wert für die Konstitutionsermittelung deutlich zeigen, erörtert werden:

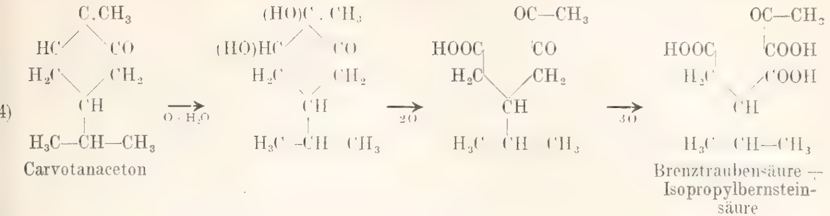
1)

CH_2
C
HC
CH_2
H_2C
CH_2
$C.C_3H_7$
Sabinen $C_{10}H_{16}$
O+H_2O
CH_2OH
COH
Glycol
2 O
COOH
Sabinensäure
O


CO+CO_2+H_2O
Sabinaketon
3 O
COOH
α-Thujondicarbon-
säure

2)

CH_3
C
HC
CH
H_2C
CH_2
α-Pinen
O+H_2O
COH
(HO)HC
α-Pinenglycol
2 O

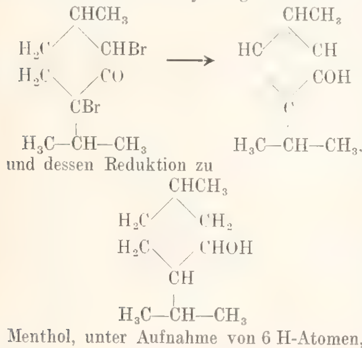

CH_3
CO
HOOC
CH
H_2C
CH_2
Pinonsäure
ent-
weder
+3 O
COOH
CO
Pinoyl-
ameisensäure
oder +6Br
+H_2O
→ O+H_2O
CBr_3H − 3HBr
+
COOH
Pinsäure

3)

$CH.CH_3$
H_2C
CH_2
CO
CH
$H_3C—CH—CH_3$
Menthon
2 O
$CHCH_3$
COOH
CO
$H_3C—CH—CH_3$
2 O
COOH
$H_3C—CO—CH_3$
β-Methyladipinsäure +
Aceton



5) Siehe neuere Arbeiten von Harries über Ozonide.

7. Uebergänge von der hydro-aromatischen Reihe zur Fettreihe und Benzolreihe und solche in umgekehrter Richtung. Hierin sind auch Uebergänge aus der hydroaromatischen Reihe in die Fettreihe enthalten; deren gibt es mehrere, z. B. entsteht bei der Belichtung einer wässerig-alkoholischen Lösung von Menthon Decylsäure $(CH_3)_2 . CH . (CH_2)_3 . CH(CH_3)CH_2 . COOH$, und ein dem Menthon isomerer Aldelyd $C_{10}H_{18}O$; ein Uebergang aus der Fettreihe in die hydroaromatische ist die Isomerisation des Rhodinals zu Menthon; der Uebergang aus der hydroaromatischen in die aromatische Reihe sei am Beispiel Dibrommenthon → Thymol geschildert



Menthol, unter Aufnahme von 6 H-Atomen, versinnbildliche die Umkehr: aromatisch → hydroaromatisch.

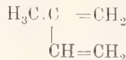
8. Beschreibung der Terpene und Campher gemäß der Einteilung im 4. Abschnitt.

I. Terpene ($C_{10}H_{16}$, $C_{10}H_{16}O$, $C_{10}H_{16}\overset{H}{O}H$).

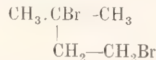
Terpen-Kohlenwasserstoffe C_5H_8 und $C_{10}H_{16}$.

A. Olefinische Terpenogene und Terpenkohlenwasserstoffe.

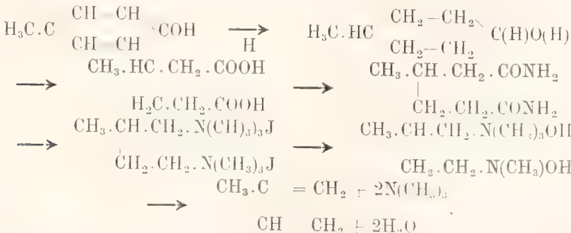
1. Hemiterpene C_5H_8. Isopren oder β-Methylbutadiën



entsteht bei der trockenen Destillation von Kautschuk und bei dem Durchleiten von Terpentinöldämpfen durch dunkelrotglühende Röhren. Kp. 37°. Es addiert leicht 2 Mol HBr unter Bildung von Methylbutandibromid



und geht durch Polymerisation entweder in Dipenten oder (unter anderen Bedingungen) in Kautschuk (s. d.) über. Technisch wird es von den Elberfelder Farbwerken gemäß folgenden Gleichungen aus Parakresol gewonnen:



2. Terpene $C_{10}H_{16}$. a) Myrcen (1)[1], $Kp._{20}$ 67°, im Bayöl, im Oel von Lippia citriodora und Hopfenöl(?); bildet sich aus Linalool—H_2O. Beim Erhitzen unter Druck auf 300° entsteht Dimyrcen $Kp._{13}$ 160—200° und nicht destillierbare Polymyrcene; das Nitrosit des Dimyrcen scheint mit dem des Kautschuks identisch zu sein.

b) Ocimen, $Kp._{30}$ 81°, im Oel von Ocimum Basilicum, von Myrcen durch die Lage der Doppelbindung unterschieden. c) Anhydrogeraniol, Kp. 172—176, aus Geraniol — H_2O.

B. Monozyklische Terpenkohlenwasserstoffe $C_{10}H_{16}$. Dihydro-p- und Dihydro-m-cymole.

1. α-Terpinen (2), $\Delta^{1,3}$ p-Menthadiën, scheint immer geringe Mengen von γ-Terpinen zu enthalten. Kp. 179—181°; optisch inaktiv. Es riecht zitronenartig, kommt im Ceylon-Cardamomenöl, Elemiöl, Corianderöl, Ajowanöl vor, von denen das letztere viel γ-Terpinen zu enthalten scheint; geht leicht in Cymol über und verharzt schnell. Es entsteht aus sehr vielen Terpenkohlenwasserstoffen und Alkoholen beim Behandeln mit verdünnten Säuren, aus Pinen und konz. H_2SO_4.

Mit N_2O_3 entsteht Δ^3 p-Menthennitroso-2-nitrit-1, $C_{10}H_{16}(NO)ONO$, F. 155, das mit Zn und Eisessig Carvenon, mit Na + Alkohol Carvomenthon und Carvomenthylamin gibt.

Bei der Oxydation mit $KMnO_4$ entsteht α, α_1-Dioxy-α-Methyl-α_1-isopropyladipinsäure F. 189, die ω-Dimethylacetonylaceton geben kann. $C_{10}H_{16}Br_4$ flüssig. $C_{10}H_{16}.HCl$, $Kp._{12}$ 87—92, gibt durch Reduktion Corvomenthen (57), trans-$C_{10}H_{16}.2HCl$, F. 51—52, trans-$C_{10}H_{16}.2HBr$, F. 58—59, trans $C_{10}H_{16}.2HJ$, F. 76. Diese Dihalogenhydrate, 1,4 Dihalogen-p-Menthane, geben mit Anilin oder alkoholischem Kali $\alpha + \gamma$-Terpinen (2 und 4), mit verdünntem Alkali Terpinenterpin (s. S. 1072) und Terpinenol-4 (45).

2. β-Terpinen (3), $\Delta^{1(7),3}$ p-Menthadien, Kp. 173—174, entsteht aus dem Kondensationsprodukt von Sabinaketon (s. S. 1073) + Bromessigester + Zn durch Abspaltung von H_2O; die dabei entstehende ungesättigte Säure $C_9H_{14}:CH.COOH$, F. 68, liefert es bei der Destillation unter CO_2-Abspaltung. Tetrabromid $C_{10}H_{16}Br_4$, F. 155. Dihalogenhydrate z. B. $C_{10}H_{16}.2HCl$, F. 52, wie bei α-Terpinen.

3. γ-Terpinen (4), $\Delta^{1,4}$ p-Menthadiën, gibt bei der Oxydation einen Erythrit $C_{10}H_{16}(OH)_4$, F 237°, den H_2SO_4 in Thymol + Carvacrol verwandelt. Tetrabromid $C_{10}H_{16}Br_4$ flüssig. Dihalogenhydrate wie bei α und β-Terpinen.

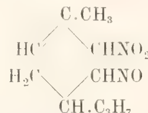
4. Terpinolen (5), $\Delta^{1,4(8)}$ p-Menthadiën, Kp. 185—187, aus Manila-Elemiharz gewonnen; optisch inaktiv; aus γ-Terpineol (41), Cineol (s. S. 1072), Terpinhydrat (s. S. 1072) beim Erhitzen mit verdünnter Säure, aus Pinen mit konz. H_2SO_4.

Sehr rein aus Dipententribromid (1, 4, 8 Tribrommenthan) mit wässerigem KOH; Darstellung aus α-Terpineol (46) + kochender Oxalsäure oder wasserfreier Ameisensäure. Dibromid $C_{10}H_{16}Br_2$, F. 70°, Tetrabromid $C_{10}H_{16}Br_4$, F. 116°, das mit Zn + Alkohol Terpinolen in sehr reinem Zustande gibt. 2 Mol HCl geben Dipentendihalogenhydrate. Es ist ein unbeständiges Terpen, das bei höherer Temperatur in Dipenten (8), durch Säuren in Terpinen übergeht. Synthese: Nopinon $C_9H_{14}O$ (s. S. 1073) + $MgJCH_3 \rightarrow$ Methylnopinol (51)-$H_2O \rightarrow$ Terpinolen.

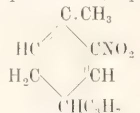
5. α-Phellandren (6), $\Delta^{2,6}$ p-Menthadiën, optisch aktiv. d-α-Phellandren, $Kp._{11}$ 61°, im Bitterfenchelöl, Elemiöl, Schinusöl, Gingergrasöl; l-α-Phellandren, $Kp._{12}$ 65°, im australischen Eukalyptusöl von Eucalyptus amygdalina und im Sternanisöl. Synthese des i-α-Phellandren, K_p 175—176°, 1, aus Δ^2 Isopropyl-4-cyclohexenon-1 + CH_3JMg —H_2O; 2, $\Delta^{2,6}$ Chlor-2-p-Menthadiën, Chlorphellandren, (aus Carvotanaceton (23) + PCl_5) + Zn + CH_3OH.

α-Phellandren + alkohol. $H_2SO_4 \rightarrow$ Terpinen.

Die Oxydation von α-Phellandren mit $KMnO_4$ liefert α-Oxy-β-isopropyl-glutarsäure und Isopropylbernsteinsäure. Die Reduktion mit Na + Alkohol löst die Δ^5-Doppelbindung und gibt Carvomenthen (57); Dibromid $C_{10}H_{16}Br_2$ + 2KOH $\rightarrow$ Cymol; α-Phellandrennitrit (α-Nitrosonitrophellandren (bimolecular)



wahrscheinlich als α, F. 113, und β, F. 105-Nitrit in cis und trans-Modifikation, gibt mit Zn + Eisessig α-Phellandrendiamin $C_{10}H_{16}(NH_2)_2$, $Kp._{17}$ 133°, mit Basen nicht wie die Nitrosonitrite-(NO).ONO-Nitrolamine; mit Na OC_2H_5 unter Abspaltung von untersalpetriger Säure Nitro-α-phellandren, $Kp._9$ (125—129°),



das mit Zn + Eisessig aktives Carvotanaceton (23) neben Dihydrocarvylamin, mit Na + Alkohol Tetrahydrocarvon (66) (+ Tetrahydrocarvylamin) gibt.

6. β-Phellandren (7), $\Delta^{1(7),2}$ p-Menthadiën, $Kp._{11}$ 57°, optisch aktiv; kommt rechtsdrehend im ätherischen Oel von Phellandrium aquaticum vor, im Schinusöl und Oel von Eucalyptus globulus. Mit Luftsauerstoff gibt

[1] Bedeutet das Formelbild auf der Tabelle Seite 1074 und 1075.

es CH_2O + 4-Isopropyl-Δ^2-cyclohexenon-1. Sein Glycol-1-7 gibt mit Säuren Tetrahydrocuminaldehyd und Dihydrocuminalkohol. AndereOxydationsprodukte des β-Phellandrens sind α-Oxy-β-isopropyladipinsäure, α-Isopropyl-glutarsäure und Isobuttersäure. β-Phellandrennitrit gibt mit Na + C_2H_5OH Cuminaldehyd (d. i. p-Isopropylbenzaldehyd) mit Zn + Eisessig β-Phellandrendiamin, $Kp._{11}$ 134. Nitro-β-phellandren gibt bei der Reduktion mit Zn + Eisessig oder Na + C_2H_5OH Dihydrocuminaldehyd, Tetrahydrocuminylamin, Cuminylamin.

7. Limonen (8), $\Delta^{1,8(9)}$ p-Menthadiën, als d-Limonen, l-Limonen und [d+l]-Limonen oder Dipenten bekannt. d-Limonen, zitronenartig riechende Flüssigkeit, Kp. 175, $[\alpha]_D = + 106{,}8^0$ ist auch Citren, Hesperiden, Carven genannt, findet sich im Pomeranzenschalenöl von Citrus aurantium, im Zitronenöl, Bergamottöl, Kümmelöl, Dillöl, Erigeronöl, Massoyöl, Sellerieöl u. s. f. l-Limonen, zitronenartig riechende Flüssigkeit, Kp. 175, $[\alpha]_D = -105^0$ kommt im Fichtennadelöl, Edeltannenöl, Elemiöl, russischen Pfefferminzöl u. a. vor. d-Limonen entsteht bei der Umsetzung von D-l-Fenchylamin mit N_2O_3 neben Fenchen (19) und Cineol (s. S. 1072). Bildung von l-Limonen 1) aus Methylnopinol (51) (Pinenhydrat) über das l-α-Terpineol (46) durch H_2O-Abspaltung und 2) aus l-Dihydrocarveolxanthogensäuremethylester durch trockene Destillation.

Die Abkömmlinge der beiden aktiven Limonene unterscheiden sich fast nur durch ihr entgegengesetztes Drehungsvermögen. Tetrabromide, F. 104, $[\alpha]_D = 73^0$. Das kristallisierte $C_{10}H_{16}Br_4$ geht über den Monobromcarveoläther in i-Carvon (s. S. 1063) über. Trockener ClH gibt Limonenmonochlorhydrat $C_{10}H_{16} . HCl$ (Δ^1-Chlor-8-p-Menthen), das mit verd. KOH in akt. α-Terpineol (46) übergeht und bei der Reduktion mit Na + Alkohol Carvomenthen (57) gibt. d-Limonen + $KMnO_4 \rightarrow$ Limonetrit $C_{10}H_{16}(OH)_4$, F. 192. d- und l-Limonen geben je ein α- und β-Nitrosochlorid.

Limonen-α-nitrosochloride:
1. d-α-$C_{10}H_{16}NOCl$, F. 103 bis 104°, $[\alpha]D_D = +313{,}4^0$
2. l-α-$C_{10}H_{16}NOCl$, F. 103 bis 104°, $[\alpha]_D$ − 314,8°

Limonen-β-nitrosochloride:
3. d-β-$C_{10}H_{16}NOCl$, F. 105 bis 106°, $[\alpha]_D = + 240{,}3^0$
4. l-β-$C_{10}H_{16}NOCl$, F. 105 bis 106°, $[\alpha]_D = - 242{,}2^0$

Limonen-α-nitrolanilide:
1. d-α-$C_{10}H_{16}NONHC_6H_5$, F. 113°, $[\alpha]_D + 102^0$
2. l-α-$C_{10}H_{16}NONHC_6H_5$, F. 113°, $[\alpha]_D - 102^0$

Limonen-β-nitrolanilide:
3. d-β-$C_{10}H_{16}NONHC_6H_5$, F. 153°, $[\alpha]_D + 87^0$
4. l-β-$C_{10}H_{16}NONHC_6H_5$, F. 153°, $[\alpha]_D - 89^0$

Die α- und β-monomolekularen Nitrolamine lassen sich nicht ineinander überführen, die α-Basen sind schwächer als die β-Basen.

Diese und die folgenden Erscheinungen lassen sich so erklären, daß — da die Limonenderivate mehr als ein asymmetrisches C besitzen — die Moleküle asymmetrisch gebaut sind und auch cis- und trans-Isomerie auftreten kann.

Mit Natriummethylat geben die 4 Nitrosochloride Carvoxim, F. 72: die d-Nitrosochloride geben l-Carvoxim, die l-Nitrosochloride d-Carvoxim.

[d + l]-Limonen, Dipenten (8), Cinen, Kp 178 bis 180°, inaktiv, riecht zitronenartig, kommt neben Cineol im Oleum cinae vor, im Campheröl, Terpentinöl, Cubebenöl, Olibanumöl, Elemiöl, Macisöl, Massoyrindenöl. Bei 250 bis 300° entsteht es aus d-Limonen, l-Limonen, Pinen (15) und Camphen (17); es bildet sich beim Vermischen gleicher Mengen von d- und l-Limonen; aus Pinen auch beim Kochen mit alk. H_2SO_4. Durch Polymerisation von Isopren und Entpolymerisation von Kautschuk bei dessen Destillation bildet es sich ebenfalls; aus Linalool (38), Terpinhydrat (s. S. 1072), α-Terpineol (s. S. 1069) und Cineol (s. S. 1072) durch Abspaltung von H_2O.

Ganz rein erhält man es aus seinem Dichlohydrat, dem 1,8 Dichlorhexahydrocymol, durch Erhitzen mit Anilin oder Natriumacetat in Eisessig. Dipenten ist ein beständiges Terpen, lagert sich aber durch Säuren in Terpinen um, konz. H_2SO_4 oder P_2S_5 baut es zu p-Cymol ab. Die Derivate des Dipenten können sowohl aus ihm, wie durch Mischen gleich großer Gewichtsmengen der entsprechenden d- und l-Limonenderivate erhalten werden. Dipentennitrosochlorid, F. 102. Z. B. α-Dipentennitrosoanilid, F. 126, ist aus ihm, aber auch aus l-α- + d-α-Anilid vom Schmelzpunkt je 123 erhalten.

8. $\Delta^{2,5}$ p-Menthadiën (9), Kp. 174, von A. v. Bayer aus dem Succinylobernsteinsäureester über das Methyl-1-isopropyl-4 cyclohexandion-2—5 und dessen Diol durch Abspaltung von 2 Mol. H_2O erhalten.

9. $\Delta^{3,8(9)}$ p-Menthadiën (10), Kp. 184, aus dem Δ^3-Tetrahydro-p-toluylsäureester von Perkin durch Verwandlung der $-CO_2C_2H_5$-Gruppe mittels $MgJCH_3$ in die Isopropylengruppe gebildet.

10a) Sylvestren (11), $\Delta^{1,8(9)}$ m-Menthadiën, Kp. 176—177, $[\alpha]_D = + 66{,}32^0$, riecht zitronenartig, kommt im indischen, russischen und schwedischen Terpentinöl und im Kiefernadelöl vor. Synthetisch von Perkin analog dem vorhergehenden Terpen aus d-Δ^2-Tetrahydro-m-toluylsäureester gewonnen. Es wird in Eisessig- oder Essigsäureanhydridlösung durch konz. H_2SO_4 intensiv blau gefärbt (wie Carvestren und Dihydrocymol), während andere Terpene rote bis rotgelbe Färbung zeigen. Durch Wärme oder Säuren wird es polymerisiert, aber nicht invertiert. Abbau zu m-Cymol. Die Dihydrohalogenide $C_{10}H_{16}$. 2hlgH sind im Gegensatz zu den entsprechenden Limonenverbindungen optisch aktiv und geben unter Halogenwasserabspaltung aktives Sylvestren, mit verd. KOH Sylveterpin $C_{10}H_{18}(OH)_2$ und Sylveterpineol $C_{10}H_{17}OH$. $C_{10}H_{16}Br_4$, F. 135—136°; Nitrosochlorid—HCl gibt Sylvecarvonoxim $\rightarrow$ Sylvecarvon $C_{10}H_{14}O$.

10b) Carvestren, wohl [d+l]Sylvestren, das Dipenten der m-Cymolreihe, Kp. 178°. Durch Destillation des Carylaminhydro-

chlorids (cf. Caron S. 1065). Synthetisch aus dem rac. Δ^2-Tetrahydro-m-toluylsäureester.

11. Isocarvestren, $\Delta^{6,8(9)}$ m-Menthadiën, Kp. 177, synthetisch aus 1-Methyl-Δ^6-cyclohexencarbonsäureester wie unter 9.

C. Bizyklische Terpenkohlenwasserstoffe $C_{10}H_{16}$.

I. Sabinan- oder Tanacetangruppe.

1. Sabinen, Kp. 163—165°, $[\alpha]_D = +80,17$, kommt im Sadebaumöl, Ceylon-Cardamomenöl, Majoranöl und Pileaöl vor. Verdünnte kalte H_2SO_4 gibt optisch aktives Terpinenol-4 (45) und 1,4 Terpin (Terpinenterpin) [s. S. 1072], warme (aus dem Terpinenol-4) Terpinen. Trockner ClH gibt ein Terpinenmonochlorhydrat, Eisessig-Halogenwasserstoff → Terpinendihydrohalogenide (1,4 Dihalogen-p-Menthane). $KMnO_4$ addiert an C_1 und C_7 je eine OH-Gruppe, Sabinenglykol, F. 54, das durch weitere Oxydation unter Zusatz von NaOH das schwerlösliche Natriumsalz der α-Oxysäure der Sabinensäure, F. 57, und das Sabinaketon $C_9H_{14}O$ (s. d.) gibt: $>C=CH_2 \rightarrow\ >COH{-}CH_2OH \rightarrow\ >COH{-}COOH \rightarrow\ >CO$: aus diesem entsteht durch weiteren Abbau α-Thujaketonsäure (s. u.).

2. α-Thujen, Kp. 152°, aus dem Thujylalkohol über dessen Methylxanthogenat und aus Thujylamin auf dem Wege der erschöpfenden Methylierung gewonnen. Mit verdünnter kalter H_2SO_4 gibt es optisch aktives Terpinenol-4 (45) und Terpinenterpin (s. S. 1072). 2 Mol ClH geben Terpinendihydrohalogenide (1,4 Chlor-p-Menthan). $KMnO_4$ gibt α-Thujaketonsäure $H_2C\!<\!\begin{array}{l}CH{-}CO.CH_3\\ |\\ C(C_3H_7).CH_2.COOH.\end{array}$

3. β-Thujen, fest, Kp. 150°, wird neben dem α-Thujen gewonnen.

4. Isothujen, Kp. 172—175°, entsteht bei der trockenen Destillation von Thujylaminchlorhydrat.

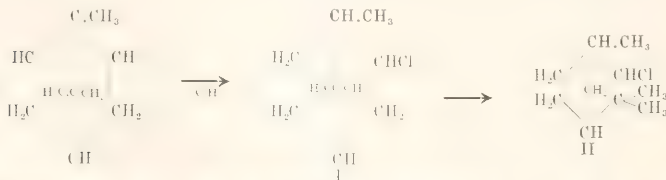
II. Kohlenwasserstoffe $C_{10}H_{16}$ der Carangruppe fehlen.

III. Kohlenwasserstoffe $C_{10}H_{16}$ der Pinangruppe.

1. α-Pinen (15), Kp. 155, bildet (mit kleinen Mengen β-Pinen (16) zusammen) den Hauptbestandteil des Terpentinöls, einer farblosen Flüssigkeit vom Kp. 155—165°, die sich folgendermaßen gewinnen läßt: Terpentin, der aus verschiedenen Nadelhölzern, vor allem den Pinusarten, ausfließende Harzsaft — eine Lösung von Harzen in Terpentinöl — wird mit Wasserdampf destilliert. Terpentinöl geht dabei über, Kolophonium bleibt zurück. Terpentinöl verdankt seinen Geruch superoxydartigen Oxydationsprodukten, die der Luftsauerstoff bildet, es mischt sich mit Alkohol und Aether, ganz wenig mit Wasser. Es löst S, P, Kautschuk, dient zur Bereitung von Firnissen und Oelfarben, sowie zur Darstellung von Campher. Amerikanische, algerische und griechische Terpentinöle enthalten hauptsächlich d-Pinen, die französischen und spanischen Oele l-Pinen. Pinen kommt auch in anderen Oelen vor. Zur Reindarstellung führt man die aus den entsprechenden Terpentinölen destillierten d-α-Pinen und l-α-Pinen in die Nitrosochloride über. Das aus diesen (mittels Anilin oder Eisessig-Na-Acetat) gewonnene α-Pinen ist inaktiv. Synthese von d-α-Pinen durch Destillation des Methylxanthogenats des durch Reduktion des Pinocamphons $C_{10}H_{16}O$ (32) gewonnenen Pinocampheols, Kp. 218°. Synthese von l-α-Pinen durch Erhitzen der Nopinolessigsäure



Es entstehen gegen 10% neben β-Pinen als Hauptprodukt und wenig Fenchen (19). Durch Addition von Halogen an die Aethylenbindung des α-Pinens entstehen Dihalogenverbindungen des Camphertypus, die beim Erhitzen Halogenwasserstoff und p-Cymol geben. 2 Mol. feuchter ClH geben Dipentendihalogenide (1,8 Dichlor-Menthan); 1 Mol. trockner ClH gibt $C_{10}H_{16}HCl$ (künstlichen Campher), und zwar ist Pinenhydrochlorid identisch mit Bornylchlorid (I); Fenchylchlorid (II) ist Nebenprodukt:

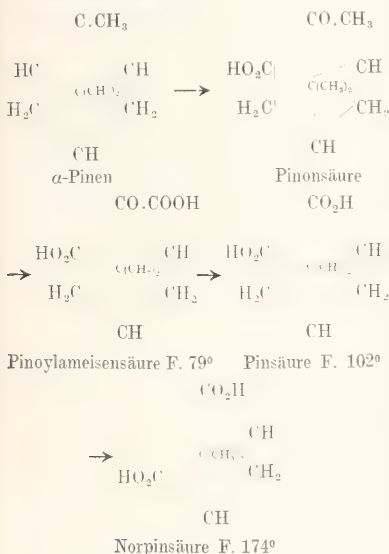


Organische Säuren geben Ester des Borneols (Borneocamphers) bezw. des ihm stereoisomeren Isoborneols (Vergleiche künstliche Darstellung des Camphers aus Terpentinöl): H_2SO_4 + Eisessig → α-Terpineol $C_{10}H_{16}.H_2O$ (Δ^1 p-Menthenol-8); HNO_3 oder H_2SO_4 → Terpinhydrat $C_{10}H_{18}(OH)_2 + H_2O$ (1,8 Dioxy-p-Menthanhydrat); Erhitzen auf 250 bis 270° → Dipenten (8). Pinendibromid $C_{10}H_{16}Br_2$, F. 170°, mit Na + Alkohol →

Camphan (62): mit Zinkstaub — Alkohol → Tricyclen $C_{10}H_{16}$, F. 68, K. 153, ein vollkommen gesättigtes Terpen. Pinen nitrosobromid, F. 92, Pinen nitrosochlorid, F. 115, mit Aether —ClH → Hydrochlorcarvoxim: aliphatische Basen → Nitrolamine, aromatische → Pinen; $NaOC_2H_5$ → Carvopinonoxim (Nitrosopinen) $C_{10}H_{14}$:NOH, F. 131°, das mit wässer. Oxalsäure Carvopinon, in Eglösg. mit Oxalsäure oder HCl i-Carvon, mit H_2SO_4 Carvacrol, mit Zn + Eg Pinylamin $C_{10}H_{15}NH_2$ und Pinocamphon (32) $C_{10}H_{16}O$ gibt.

Oxydationsprodukte des α-Pinens: 1. unter Wahrung des bizyklischen Systems: Luftsauerstoff → Superoxyde (neben HCOOH, CH_3COOH und Cymol), und d-Verbenon $C_{10}H_{14}O$, Ozon → Ozonide $C_{10}H_{16}O_3$; 1%, $KMnO_4$ → α-Pinenglycol $C_{10}H_{16}(OH)_2$, Kp.$_{14}$ 146°.

2. unter Lösung des Sechsringes, Wahrung des Piceanringes:



$KMnO_4$ oder $O_3 + H_2O$ → Pinonsäure $C_{10}H_{16}O_3$ F. 70 (aktiv), F. 104 (inaktiv).

3. unter Lösung des Piceanringes, Wahrung des Sechsringes: Luft + Sonnenlicht → Pinolhydrat (Sobrerol) = Δ^6-Dioxy-2,8-p-Menthen; Mercuriacetat → rac. Sobrerol und 8-Oxydihydrocarvon; HNO_3 → p-Toluylsäure und Terephtalsäure.

4. unter Lösung des bizyklischen Systems: energische Oxydationsmittel →

$(CH_3)_2C.CH.CH_2.COOH$ / $H_3C.CO\ CH_2.COOH$ Ketoisocamphersäure $C_{10}H_{16}O_5$,

$(CH_3)_2C.CH.CH_2.COO$ / $CH_2.COOH$ Terpenylsäure $C_8H_{12}O_4$ F. 90°,

$(CH_3)_2C.CH.CH_2.COO$ / COOH Terebinsäure $C_7H_{10}O_4$ F. 175°.

2. β-Pinen (16), Nopinen, Kp. 162—163°, links drehend, stets in geringen Mengen neben α-Pinen vorkommend; in Terpentinölen, Kienöl, sibir. Fichtennadelöl, Zitronenöl, Corianderöl, Ysopöl. Aus Nopinolessigsäure (S. 1062) beim Erhitzen mit Essigsäureanhydrid. alk. H_2SO_4 → Terpinen; ClH → Dipentendichlorhydrat und Bornylchlorid; NOCl → kein Additionsprodukt; N_2O_3 → unbeständiges Nitrosonitrokörper $C_{10}H_{16}<^{NO}_{NO_2}$, das schon mit H_2O-Dampf untersalpetrige Säure abspaltet und Nitro-β-Pinen $C_{10}H_{15}NO_2$ (Nitroterebenten) gibt, → Amidoterebenten, Kp.$_{12}$ 95°, → Alkohol (7-oxy-$\Delta^{2,6}$-p-Menthadiën) → Cuminsäure (vgl. das Verhalten des β-Phellandrens). Oxydation des β-Pinens mit $KMnO_4$ → >COH CH_2OH, F. 72, → >COH.COOH Nopinsäure $C_{10}H_{16}O_3$, F. 126°, (schwer lösl. Na-Salz) → >CO, Nopinon, $C_9H_{14}O$, Kp. 209, aus dem mit Bromessigester + Zn über die Nopinolessigsäure >C<$^{OH}_{CH_2.COOH}$ α- und β-Pinen (neben Fenchen) synthetisiert werden können.

IV. Kohlenwasserstoffe $C_{10}H_{16}$ der Camphangruppe.

1. Camphen (17) F. 48—52°, Kp. 159 bis 161°, der einzige feste Terpenkohlenwasserstoff, der in der Natur vorkommt, die 3 Modifikationen d-, l- und optisch inaktives Camphen verhalten sich in chemischer Beziehung gleich. Vorkommen im Campheröl, Zitronellöl von Andropogon nardus, Ingweröl, Kessoöl, sibirischen Fichtennadelöl. Bildung unter Halogenwasserstoffabspaltung aus Pinenhydrochlorid, unter Wasserabspaltung aus Borneol (53), Isoborneol, Camphenhydrat und dem (aus Camphenilon (s. S. 1073) + $MgJCH_3$ erhaltenen) Methylcamphenilol; unter NH_3-Abspaltung aus Bornylamin + Essigsäureanhydrid. Camphendibromid $C_{10}H_{16}Br_2$, F. 91°. Camphenhydrochlorid $C_{10}H_{16}HCl$, F. ca 155°, ist identisch mit Isobornylchlorid und mit Pinenhydrochlorid wahrscheinlich stereoisomer. Camphen + Eisessig + 50% H_2SO_4 → Isoborneolacetate, N_2O_3 → Nitrosonitrocamphen, das unter Abspaltung von untersalpetriger Säure in Camphenilnitrit (Nitrocamphen)

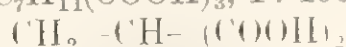
$C_8H_{14}>C:CHNO_2$ übergeht. Dieses gibt bei der Reduktion $C_{10}H_{16}O$ Camphenilanaldehyd (33) $>CH.CHO$, bei der Oxydation $C_9H_{14}O$ Camphenilon $>CO$.

Oxydationen des Camphens:

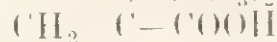
Camphen mit $KMnO_4$ → Camphenglykol

$$C_8H_{14}>COH:CH_2OH$$

F. 200°, das durch verd. H_2SO_4 unter H_2O-Abspaltung in Camphenilanaldehyd $C_{10}H_{16}O$ übergeht, der Camphenilansäuren $C_9H_{16}O_2$ vom F. 65 u. 118° bildet: $>CH.COOH$. Camphenglykol durch weitere Oxydation → Oxycamphenilansäure $>COH.COOH$ (Camphenilolsäure) $F._{171}$ $C_{10}H_{16}O_3$, die ihrerseits durch weitere Oxydation $>CO$ das Camphenilon $C_9H_{14}O$, F. 43, (s. S. 1073) ein niederes Homologes des Fenchons $C_{10}H_{16}O$ (36) gibt. Camphen + Ozon → $C_{10}H_{16}O_3$. Dieses Ozonid gibt mit Wasser oder Eisessig neben Camphenilon unter Sprengung des 6-Ringes das δ-Oxycamphenilonsäurelacton. Im Tierkörper wird Camphen zu Camphenilanaldehyd oxydiert. Chromsäure bildet aus Camphen Campher $C_{10}H_{16}O$ (36). HNO_3 verd. gibt Carboxylapocamphersäure (Camphosäure) $C_7H_{11}(COOH)_3$, F. 196°:

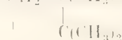


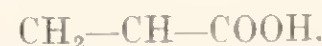




2. Bornylen, F. 113°, Kp. 146°, $[\alpha]_D$— 21,69°, zeigt große Flüchtigkeit, bildet sich aus Borneol oder Bornylhaliden unter Bedingungen, die diejenigen Atomverschiebungen, die zu Camphen führen, fast vermeiden: durch trockene Destillation des Bornylxanthogensäuremethylesters, aus Bornyljodid mit konz. alkoh. Kali. Rein wird es aus der über die Camphocarbonsäure und Borneolcarbonsäure gebildeten Bornylencarbonsäure durch CO_2-Abspaltung erhalten. $KMnO_4$ gibt Camphersäure:

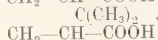




3. Fenchen, Kp. 154—158; rechtsdrehende, linksdrehende und optisch inaktive Fenchene erhält man, je nachdem, welches Ausgangsmaterial man nimmt: aus Fenchylalkohol gewonnene Fenchylchloride werden mit Basen oder alkoh. Kali, Isofenchylalkohol mit $ZnCl_2$, Fenchylamin mit HNO_2 behandelt (dabei Limonen als Nebenprodukte). Synthetisch ist Fenchen aus dem Nopinolessigester (aus Nopinon, Bromessigester + Zn) $C_9H_{14}<^{OH}_{CH_2.COOR}$ durch H_2O-Abspaltung und Destillation der ungesättigten Säure als links- oder rechts drehendes erhalten worden.

Fenchendibromid F. 62 (inakt.). F. 88 (aktiv); $C_{10}H_{16}HCl$ flüssig, wohl mit den Fenchylchloriden identisch; Fenchen + alkoholische oder Eisessig-H_2SO_4 → Isofenchylalkohol. Fenchen ist gegen starke HNO_3 ziemlich beständig. $KMnO_4$ greift D-l-Fenchen (d. i. l-Fenchen aus d-Fenchon gewonnen) am schwierigsten an; es entsteht Oxyfenchensäure $C_8H_{14}>COH.COOH$, und zwar liefern D-l-Fenchen und L-d-Fenchen Säuren mit gleicher Eigenschaft, aber umgekehrtem Drehungsvermögen, F. 153° $[\alpha]_D = \pm 63°$; D-d-Fenchen gibt schwach rechtsdrehende Säure $[\alpha]_D = + 7{,}7$, F. 138. Die racemisch inaktive Säure schmilzt bei 142 bis 143°. Die Oxydation der Oxysäure vom F. 153 gibt D-d-Fenchocamphoron, F. 110°, der vom F. 138 D-l-Fenchocamphoron, F 63, Ketone $C_9H_{14}O$ die als niedere Homologe des Camphers $C_{10}H_{16}O$ diesen ähnlich sind und bei der Oxydation Apocamphersäure (Camphopyrsäure) $CH_2—CH—COOH$





F. 204, geben. Diese Säure entsteht auch aus Fenchen mit nicht zu starker HNO_3.

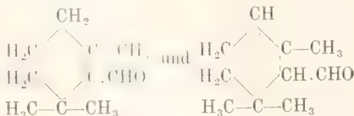
Campherarten $C_{10}H_{16}O$.

Unter den sauerstoffhaltigen Bestandteilen der ätherischen Oele fanden sich häufig Stoffe mit Aldehyd-, Keton- oder Alkoholcharakter der Zusammensetzung $C_{10}H_{16}O$ und $C_{10}H_{18}O$, die man Campher nannte. Ihre Beziehungen zu den Terpenen sind sehr nahe und die zu Alkoholen der Zusammensetzung $C_{10}H_{20}O$ von Interesse.

Terpenaldehyde und Terpenketone. $C_{10}H_{16}O$.

A. Olefinische Terpenketone $C_{10}H_{16}O$.

Citral, Geranial (20), Kp. 228—229; schwach gelb, riecht zitronenartig, kommt vor allem im Lemongrasöl vor, ferner im Zitronenöl, Verbenaöl usf., kann durch Oxydation von Geraniol $C_{10}H_{17}OH$ gewonnen werden. Citral a und b sind 2 stereoisomere Formen. Durch Hydrolyse geht es in Methylheptenon und Acetaldehyd über; Ozon → Aceton, Lävulinaldehyd und Glyoxal; unter Abspaltung von H_2O → Cymol; schützt man die CHO-Gruppe durch Ueberführung in $CH=NC_6H_5$, $—CH=CH.COOR$ und andere Citralidenverbindungen, und kondensiert darauf mit H_2SO_4 oder H_3PO_4, so entstehen Δ^1 oder β-Cyclocitral und Δ^2 oder α-Cyclocitral:



die durch Kondensation mit Aceton + Na-

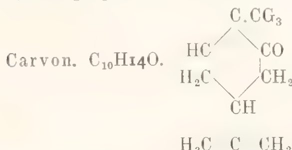
triumäthylat in α- oder β-Jonon übergehen: $C_9H_5>CH:CH.CO.CH_3$; diese Jonone mit intensivem Veilchengeruch werden auch gewonnen nach Tiemann, wenn man das aus Citral + Aceton entstehende Pseudojonon $(CH_3)_2C:CH.CH_2.CH_2(CH_3):CH.CH:CH.CO.CH_3$ mit konz. H_2SO_4 über das Pseudojononhydrat zum Ringketon schließt. (Δ^3-Cyclocitral und Δ^4-Cyclocitral geben mit Aceton α-Iron und β-Iron; das β-Iron ist mit dem aus der Veilchenwurzel isolierten Iron identisch (Merling und Welde).

B. Monozyklische Terpenketone $C_{10}H_{16}O$ (Ketomenthene).

1. Santolinon (21), $\Delta^{1,(7)}$ p-Menthenon-2, wollen Francesconi und Scaraffia neuerdings im Oel von Santolina Chamaecyparissus gefunden haben.

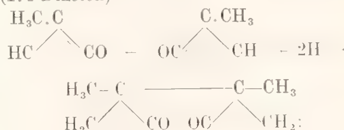
2. Carvenon (22), (Carveol) Δ^3 p-Menthenon-2, Kp. 232°, aus 1, 2, 8 Trioxyhexahydrocymol (aus α-Terpineol (Δ^1-Menthenol-8) + $KMnO_4$) und aus 1, 2, 4 Trioxyhexahydrocymol (aus Terpinenol-4 (Δ^1 Menthenol-4) + $KMnO_4$) beim Erwärmen mit verdünnten Mineralsäuren neben Cymol, aus Dihydrocarvon (24) ($\Delta^{8(9)}$ p-Menthenon-2) mittels Säuren oder hoher Temperatur, aus Caron $C_{10}H_{16}O$ (S. 1065) und Campher (34) mittels Säuren, aus α-Terpinennitrosit (Δ^3 p-Menthennitroso-2-nitrit-1) mit Zn + Eisessig. Oxim, F. 91, Semicarbazon, F. 202. Carvenon + $FeCl_3$ → Carvacrol (Methyl-1-isopropyl-4-phenol-2); + P_2O_5 → Cymol; $KMnO_4$ → α-Methylglutarsäure; Uebergang in α-Terpinen (s. S. 1058).

3. Carvotanaceton (23), Δ^3 p-Menthenon-2, Kp. 228, in optisch aktiver Form $[\alpha]_D \pm 19{,}2°$, durch Reduktion von Nitro-α-Phellandren (S. 000), in inaktiver Form durch Erhitzen von Thujon (29), aus Brom-1-tetrahydrocarvon (vgl. 66) —HBr, aus Oxy-1-tetrahydrocarvon —H_2O; Oxim, F. 72° (aktiv), F. 92° (inaktiv); Semicarbazon, F. 173° (aktiv), 177° (inaktiv); Carvotanaceton + H_2S (ähnlich wie Carvon) → $(C_{10}H_{16}O)_2H_2S$, F. 220°; mit $KMnO_4$ → Brenztraubensäure + Isopropylbernsteinsäure; Uebergang in α-Phellandren (s. S. 1058).



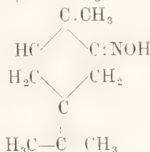
Im Anschluß an das Carvotanaceton möge das einzige Ketodihydro-p-Cymol $C_{10}H_{14}O$ ein Menthadiënketon, das Carvon, $\Delta^{6,8(9)}$ p-Menthadiënon-2 behandelt werden.

a) d-Carvon, Kp. 230°, $[\alpha]_D = + 60°$, kommt im Kümmelöl und im Dillöl vor; Erhitzen mit Laugen oder Säuren → Carvacrol (Methyl-1-iso-propyl-4-phenol-2); PCl_5 → $C_{10}H_{14}Cl_2$ $\xrightarrow{-HCl}$ Methyl-1-isopropyl-4-chlor-2-benzol; $C_{10}H_{14}O.HCl$ und $C_{10}H_{14}O.HBr$ + Alkalien → hlgH + Eucarvon (S. 1076); Zinkstaub + NaOH → Gemisch von Dieucarvelonen $(C_{10}H_{15}O)_2$; $C_{10}H_{14}O.H_2O$ Carvonhydrat; $(C_{10}H_{14}O)_2H_2S$; Carvon + Brom gibt Tri-, Tetra- und Pentabromide $C_{10}H_{15}OBr_3$, $C_{10}H_{14}OBr_4$, $C_{10}H_{13}OBr_5$; Reduktion: 1. Na + Alkohol, Dihydrocarveol: 2H an Δ^3, 2H an CO (gibt mit H_2SO_4 Terpinen); 2. Zn + NaOH (oder Eisessig), Dihydrocarvon ($\Delta^{8(9)}$ p-Menthenon-2); 3. Dicarvelon $(C_{10}H_{15}O)_2$ (1:4 Diketon)

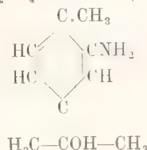


Carvon + Ammoniumformiat → Dihydrocarvylamin ($\Delta^{8,9}$ p-Menthenamin-2), dessen Hydrochlorid bei 200° Terpinen + Cymol, + $NaNO_2$ Dipenten gibt.

Semicarbazon $C_{10}H_{14}N.NH.CO.NH_2$, F. 160—162°. d-Carvoxim, $C_{10}H_{14}NOH$, F. 72, aus d-Carvon + H_2NOH und aus l-Limonennitrosochlorid $C_{10}H_{16}NOCl$—HCl, geht durch Reduktion in Dihydrocarvylamin über; mit alk. H_2SO_4 → Carvacrol $C_{10}H_{13}OH$ + Carvacrylamin $C_{10}H_{13}NH_2$ (Methyl-1-iso-propyl-4-phen-ol (resp. -ylamin)-2; Aetzkali → Carvacrylamin; konz. H_2SO_4 → p-Amidothymol (Methyl-1-isopropyl-4-amido-2-phenol-5); Carvoxim + NH_2OH → Oxaminodihydrocarvoxim ($\Delta^{8(9)}$ oxamino-6-p-Menthenonoxim-2); d-Carvoximhydrochlorid + $NaOCH_3$ → Isocarvoxim



($\Delta^{4(8),6}$ p-Menthadiënonoxim-2). Das Isocarvoxim gibt mit Aetzkali Carvacrylamin mit verd. H_2SO_4 Carvacrol + Carvolin:



Oxydation von Carvon gibt die Säure $C_8H_{12}O_5$, F. 192,5 (Oxyterpenylsäure), deren Lacton $C_8H_{10}O_4$ und eine zweibasische Säure $C_8H_{14}O_4$, F. 94—95°.

b) l-Carvon, Kp. 230°, $[\alpha]_D = -60°$, im Krauseminzeöl und im Kuromojiöl; bildet sich aus d-Limonennitrosochlorid — HCl und Hydrolyse der entstandenen l-Carvoxims.

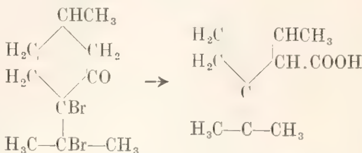
c) i-Carvon, Kp. 230, 1. durch Vermischen von d- und l-Carvon; 2. aus Dipentennitrosochlorid oder aus Pinennitrosochlorid: $C_{10}H_{16}NOCl \rightarrow C_{10}H_{14}\ NOH \rightarrow C_{10}H_{14}O$; 3. aus d-Limonentetrabromid $C_{10}H_{16}Br_4 \rightarrow C_{10}H_{14}BrOCH_3 \rightarrow C_{10}H_{15}OCH_3 \rightarrow C_{10}H_{14}O$; 4. aus Nitrosopinenbromid $C_{10}H_{14}Br_2\ NOH \rightarrow C_{10}H_{15}NH_2 \rightarrow C_{10}H_{14}O$; 5. aus α-Terpineolnitrosochlorid $C_{10}H_{17}OH\ NOCl \rightarrow C_{10}H_{15}OH\ (NOH) \rightarrow C_{10}H_{14}\ NOH \rightarrow C_{10}H_{14}O$; 6. aus α-Terpineol (46) $C_{10}H_{17}OH \rightarrow C_{10}H_{17}Br_2OH \rightarrow C_{10}H_{17}Br_3 \rightarrow C_{10}H_{15}OCH_3 \rightarrow C_{10}H_{14}O$. i-Carvoxim, F. 93.

4. Dihydrocarvon (24), $\Delta^{8(9)}$ Menthenon-2, Kp. 221°, im Kümmelöl; d-Form aus l-Carvon, l-Form aus d-Carvon durch Reduktion mit Zn + NaOH oder Eisessig; aus den entsprechenden Dihydrocarveolen durch Oxydation. Oxime, F. 88; inaktives Oxim, F. 115; Dihydrocarvon: Reduktion → Tetrahydrocarvon (66) oder Dihydrocarveol; mit H_2SO_4 → Carvenonisomeritation (22), $FeCl_3$ → Carvacrol; $C_{10}H_{16}O + NaHSO_3$; $KMnO_4$ → Ketoglycol $C_{10}H_{16}(OH)_2O$, F. 115°–120°; $KMnO_4$ und CrO_3 → Methyl-1-Acetyl-4-cyclohexanon-2.

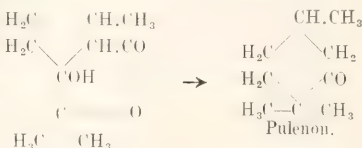
5. Δ^1 p-Menthenon-3 (25), Kp. 236, im japanischen Pfeffermünzöl, aus Terpinenol-1 (Δ^3 p-Menthenol-1) über das 1, 3, 4-Trioxyhexahydrocymol, zu gewinnen, wenn letzteres mit Salzsäure erwärmt wird. Semicarbazon, F. 225.

6. Δ^4 p-Menthenon-3 (26), Kp. 213. Sein Oxim, Nitrosomenthen, bildet sich, wenn aus dem Nitrosochlorid des Δ^4 p-Menthens, $C_{10}N_{18}$, HCl abgespalten wird.

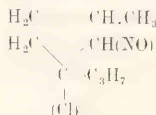
7. Pulegon (27), $\Delta^{4(8)}$ p-Menthenon-3, Kp. 221°, im Poleiöl; wird durch H_2 zu Menthon (67) (Methyl-1-isopropyl-4-cyclohexanon) reduziert; durch Hydrolyse geht es in Methyl-3-cyclohexanon-1 und Aceton über, aus denen durch Kondensation nicht Pulegon zurück, sondern Methyl-3-cyclohexylaceton gewonnen wird; durch Oxydation gibt es Aceton und β-Methyladipinsäure, die auch das — für viele Umsetzungen in der Reihe der hydroaromatischen Verbindungen wichtige — β-Methylcyclohexanon bei der Oxydation gibt. Die β-Methyladipinsäure ist für die Synthese des Isoprens (s. S. 1057) von großer Bedeutung geworden. Pulegondibromid, $C_{10}H_{16}Br_2O$, gibt beim Erwärmen mit $NaOCH_3$ Pulegensäure $C_{10}H_{16}O_2$, (6 Ring → 5 Ring) die große Aehnlichkeit mit Campholen- und Fencholensäure aufweist:



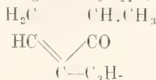
Die Pulegensäure gibt mit $KMnO_4$ ein Oxylakton, das beim Erwärmen mit H_2SO_4 neben der Abspaltung von CO_2 eine — der Pinakolinumlagerung analoge — Atomverschiebung, die den Uebergang eines 5-Ringes in den 6-Ring bedingt, aufweist.



Der aus der Pulegensäure sich ableitende Kohlenwasserstoff Pulegen C_9H_{14} gibt über das Nitrosochlorid



das Keton Pulegenon $C_9H_{14}O$,



das dem Campherphoron (S. 1073) isomer ist.

Pulegon + NH_2OH + Alkali → Isopulegonoxim (Bindungsverschiebung durch Alkali!).

8. Isopulegon (28), $\Delta^{8(9)}$ p-Menthenon-3, $Kp._{14}$ 103°, besitzt 2 asymmetrische C-Atome, aus dem eben erwähnten Oxim mit Oxalsäure, aus Pulegonhydrobromid — HBr, aus dem olefinischen Terpenaldehyd Citronellal (s. d. S. 1071), der durch Isomerisation den dem Isopulegon entsprechenden Alkohol Isopulegol $C_{10}H_{18}O$ gibt. Isopulegon mit Barytlauge → Pulegon.

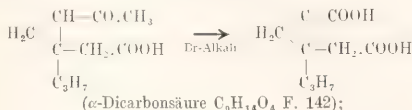
B. Bizyklische Terpen-Ketone $C_{10}H_{16}O$.

I. Sabinan- oder Tanazetangruppe.

1. Thujon (29), Kp. 200°, als linksdrehendes α-Thujon, $[\alpha]_D$ — 10,23° im Thujaöl, Semicarbazon, F. 186°, Oxim, flüssig; als rechtsdrehendes β-Thujon $[\alpha]_D$ + 76,16°, im Rainfarnöl von Tanacetum vulgare, Semi-

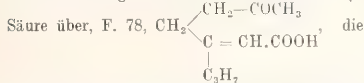
carbazon, F. 171 und 175°, Oxim, F. 55°. Zusammen kommen sie im Wermutöl, Salbeiöl, Absintöl und Artemisiaöl vor. Thujon + H_2SO_4 → Isothujon; bei 280° — Carvotanazeton (23) (Δ^6 p-Menthenon-2); $FeCl_3$ → Carvacrol; Benzylidenthujon, Kp.₉ 178°.

Oxydation mit $KMnO_4$ bei 0° viel α-Thuja- oder Tanacet-Ketoncarbonsäure $C_{10}H_{16}O_3$ F. 75°



(α-Dicarbonsäure $C_9H_{14}O_4$ F. 142);

im Thujon und der α-Dicarbonsäure ist der 3Ring Säuren und erhöhter Temperatur gegenüber beständiger als in der α-Thujaketonsäure. Diese α-Säure geht beim Destillieren in die β-Säure über, F. 78,

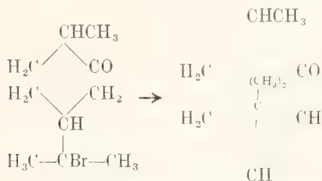


die mit Hypobromit die viel löslichere β-Dicarbonsäure, F. 113 bis 114°, $CH_2\langle^{CH_2-COOH}_{C=C\,.\,COOH}$ C_3H_7 gibt. Beide Thujaketonsäuren geben bei der trockenen Destillation Thujaketon $C_9H_{16}O$ der Formel $(CH_3)_2CH.C(=CH_2).CH_2.CH_2.CO.CH_3$, da es sich in ω-Dimethylacetonylaceton abbauen läßt.

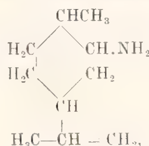
2. Dihydroumbellulon (30), Kp.₁₀ 185°, aus dem durch Reduktion von Umbellulon $C_{10}H_{14}O$ (S. 1076) mit Na + Alkohol gebildeten Dihydroumbellulol $C_{10}H_{17}OH$ durch Oxydation mit CrO_3 gewonnen. Die Benzylidenverbindung liefert wie das Benzylidenthujon mit $KMnO_4$ l-Homotanazetondicarbonsäure $C_{10}H_{16}O_4$ F. 148°, die wahrscheinlich den 3-Ring enthält.

II. Carangruppe: Ketone $C_{10}H_{16}O$.

Caron (31), Kp.₁₅ 100°, nur synthetisch gewonnen und zwar aus Dihydrocarvonhydrobromid mit alkoholischem Kali:



In der Kälte ist es gegen $KMnO_4$ beständig, in der Wärme gibt es 1,1 Dimethylcyclopropandicarbonsäure-2,3 $(CH_3)_2C\langle^{CH.COOH}_{CH.COOH}$. Sprengungen des Carondreiringes: 1. Caron auf ca. 210° erhitzt gibt Δ^3 p-Menthenon-2 (Carvenon) (22); HBr → Dihydrocarvonhydrobromid; H_2SO_4 → Oxy-8 — tetrahydrocarvon (8 Oxy-p-Menthanon-2. 2. Caronoxim F. 78° → Carylamin $C_{10}H_{17}NH_2$ → + HCl → Vestrylamin



dessen Hydrochlorid beim Erhitzen Carvestren (11) gibt. 3. Cyan-6-Brom-8-p-Menthanon-2 (Cyandihydrocarvonhydrobromid) gibt mit alkoholischem Kali Cyancaron $C_{10}H_{15}(CN)O$ F. 55°; dieses bildet mit Kalilauge Eucarvon (S. 1076) ein Keton $C_{10}H_{14}O$, das als Trimethyl-1-1-4-cycloheptadiën-4-6-on-3 aufgefaßt wird; es entsteht auch aus Carvonhydrobromid mit alkoh. Kali. Eucarvon gibt beim Erhitzen Carvacrol (Ringverkleinerung!). Reduktion → Dihydroeucarveol $C_{10}H_{17}OH$ und Tetrahydroeucarveol $C_{10}H_{19}OH$, deren zugehörige Ketone das Dihydroeucarvon $C_{10}H_{16}O$ und Tetrahydroeucarvon $C_{10}H_{18}O$ sind.

III. Pinangruppe: Keton $C_{10}H_{16}O$.

Pinocamphon (32), Kp.₁₂ 87°, ist als l-Pinocamphon im Ysopoel aufgefunden. Es entsteht aus Nitrosopinen $C_{10}H_{14}:NOH$ (aus Pinennitrosochlorid — HCl), das als Oxim der Carvopinons angesehen wird, durch Reduktion mit Zn + Eisessig neben Pinylamin und gibt mit $KMnO_4$ Pinonsäure (S. 1061) und eine mit der Camphersäure isomere Dicarbonsäure $C_{10}H_{16}O_4$, F. 186°.

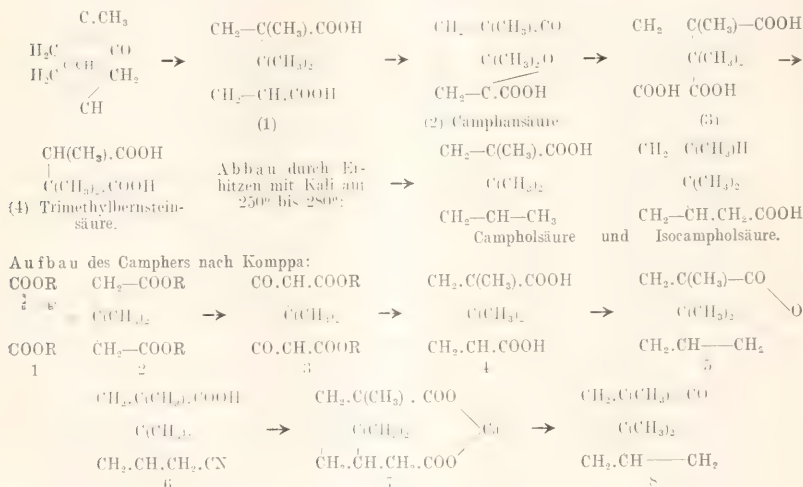
IV. Camphangruppe: Aldehyde und Ketone $C_{10}H_{16}O$.

1. Camphenilanaldehyd (33), F. 70°, Kp.₁₄ 96°, aus dem durch Oxydation von Campher gebildetem Camphenglykol $C_{10}H_{16}(OH)_2$ durch Wasserabspaltung mittels verdünnter H_2SO_4. Der Aldehyd gibt durch Oxydation wahrscheinlich 2 stereoisomere Camphenilansäuren, aus denen α-Brom- und α-Oxycamphenilansäure (Camphenilolsäure $C_{10}H_{16}O_3$, F. 171°), erhalten werden

können. Weiteres siehe unter Camphen (S. 1062).

2. Campher (34), 1, d-Campher, Japancampher, F. 175°, Kp. 204, $[\alpha]_D + 44,22°$ in Alkohol. 2. l-Campher, Matricariacampher, F. 175°, Kp. 204° $[\alpha]_D - 44,22°$. 3. [d + l]-Campher, F. 178,6°. Der d-Campher ist im Campherbaum Cinnamonum camphora enthalten und wird durch Destillation mit Wasserdampf und Sublimation erhalten; — l-Campher kommt im Oel von Matricaria Parthenium vor. [d + l]-Campher, durch Vermischen von d- und l-Campher und durch Razemisierung des d-Camphers mittels $AlCl_3$. Technische Gewinnung von Campher: 1. Pinen $C_{10}H_{16}$ (15) wird beim Behandeln mit organischen Säuren in Ester des Borneols oder Isoborneols verwandelt $C_{10}H_{17}OCOR$ z. B. $C_{10}H_{17}OCOCH_3$ Isoborneolacetat oder 2. Pinenchlorhydrat wird mit Zn-Acetat + Eisessig in Isoborneolacetat verwandelt, 3. Camphen (17) wird mit Eisessig + 50% H_2SO_4 auf 50 bis 60° erhitzt und gibt dabei Isoborneolacetat. Die durch Hydrolyse entstehenden Alkohole $C_{10}H_{17}OH$ Borneol oder Isoborneol geben bei der Oxydation (meist inaktiven) Campher.

Campher ist eine farblose, durchscheinende, zähe Masse, die in glänzenden Kristallen sublimiert. Er ist sehr flüchtig; aus Alkohol umkristallisierbar. Er wird zur Fabrikation des rauchlosen Pulvers und in der Celluloidindustrie gebraucht. Uebergänge des Camphers: P_2O_5 → p-Methyl-isopropylbenzol (Cymol); Jod → Methyl-1-isopropyl-4-phenol-2 (Carvacrol); konz. H_2SO_4 von 105 bis 110° → Δ^3 p-Menthenon-2 (Carvenon, Carveol) und 1, 3, 4 Acetylxylol; Kochen mit HNO_3 — Camphersäure (1) und Camphoronsäure (3) u. a. Abbau durch Oxydation:



Oxalester (1) und β-Dimethylglutarsäureester (2) werden durch $NaOC_2H_5$ zu Diketoapocamphersäureester (3) kondensiert, dieser wird methyliert und zur cis- und trans-[d + l]-Camphersäure (4) reduziert; cis-Camphersäureanhydrid wird zu dem Lakton Campholid (5) reduziert. Dieses gibt mit KCN das Nitril der Homocamphersäure, deren Kalksalz bei der Destillation Campher bildet. Da die racemische Camphersäure in ihre optisch aktiven Komponenten zerlegbar ist, läßt sich auch optisch aktiver Campher synthetisch darstellen. i-Camphersäure bildet sich auch aus i-γ-Brom-β, β, γ-trimethylcyclopentan-α-Carbonsäure $(CH_3)_2C.C(CH_3)Br.CH_2.CH_2.CH.COOH$ und KCN nach Verseifung des γ-Cyanids. Die —CO-Gruppe des Camphers und die durch sie reaktiv gewordenen H-Atome der benachbarten $—CH_2$-Gruppe haben zur Bildung sehr vieler Campherderivate Anlaß gegeben: a) Reaktionsfähigkeit der $—CH_2$-Gruppe. Mono- und Dihalogencampher; aus den Monohalogencamphern + HNO_3: Halogennitrocampher, die durch Reduktion Nitro- und Amidocampher geben. Camphersulfosäuren und d-Bromsulfocamphersäure finden zur Spaltung racemischer Basen Verwendung. Isonitrosocampher, —CO.C(:NOH)— (aus Campher + Amylnitrit + $NaOC_2H_5$) geht durch Erhitzen, durch PCl_3, CH_3COCl usw. in Camphersäuremononitril, durch Reduktion in Amidocampher über, der sich als α-Amidoketon zur Bildung von

heterozyklischen Stoffen eignet; sein Hydrochlorid wirkt ähnlich wie Curare. Oxycampher aus Campherchinon —CO—CO— können auch aus Isonitrosocampher erhalten werden: letzteres entsteht durch Kochen mit verd. H_2SO_4, durch HNO_2 oder $NaHSO_3$ und gibt beim Reduzieren mit Zn + Eisessig Oxycampher, der mit Na + Alkohol Campherglycol, mit Naamalgam Campher gibt und bei der Oxydation Campherchinon bildet. Camphocarbonsäure entsteht aus Campher, Na + CO_2 oder Natriumamid und CO_2 in Benzollösung, oder aus Bromcampher, Mg + CO_2 in Aether; die Ester der Camphocarbonsäure zeigen die Reaktionen der β-Ketocarbonester wie Acetessigester; die Säure gibt mit Diazobenzolchlorid Campherchinonphenylhydrazon $C_8H_{14}>\begin{array}{l}C:NNHC_6H_5\\ |\\ CO\end{array}$ oder sein desmotropes $>\begin{array}{l}C.N_2C_6H_5\\ \|\\ COH\end{array}$; durch Reduktion bilden sich Borneolcarbonsäuren, die unter H_2O-Abspaltung Bornylencarbonsäuren geben. Addition von Halogenwasserstoff an diese gibt β-Chlorhydrobornylencarbonsäuren, Addition von H_2 Camphan-5-carbonsäure. Cyancampher (aus Na-campher + Cyangas) gibt beim Alkylieren O-Alkylcyancampher $>\begin{array}{l}C.CN\\ \|\\ COR\end{array}$ und C-Alkylcampher $>\begin{array}{l}C(R).CN\\ \\ CO\end{array}$; Verseifung der letzteren und CO_2-Abspaltung gibt z. B. Methylcampher —CO.CH.CH_3—, dessen Bromderivat —CO.CBr.CH_3— durch BrH-Abspaltung Methylencampher —CO.C(:CH_2)— gibt; Dimethylcampher $C_8H_{14}<\begin{array}{l}CO\\ |\\ C(CH_3)_2\end{array}$ entsteht durch $NaNH_2$ + JCH_3 auf Campher in Aether oder Benzollösung, durch Erwärmen mit $NaNH_2$ entsteht Dimethylcampholsäureamid $C_8H_{14}<\begin{array}{l}CONH_2\\ \\ CH(CH_3)_2\end{array}$; Oxymethylencampher $C_8H_{14}<\begin{array}{l}CO\\ \\ C:CHOH\end{array}$, F. 80, aus Natriumcampher oder Camphermagnesiumbromid + HCOOR und auch aus α-Mono- und Dihalogenkampher + CH_3ONa $(<\begin{array}{l}CO\\ |\\ CHBr\end{array}$ + $\begin{array}{l}H\\ H\end{array}$CHONa + CH_3ONa = Oxymethylencampher + NaBr + CH_3OH + H_2); er ist eine starke Säure, bildet Aether, Ester, Chlorid; durch Reduktion mit Na + Alkohol → Camphylglycole $<\begin{array}{l}CHCH_2OH\\ |\\ CHOH\end{array}$, mit mol. Wasserstoff + Pd Methylcampher, der nach diesem Reduktionsverfahren noch besser aus dem Chlorid entsteht. Homologe Acylcampher $C_8H_{14}<\begin{array}{l}CO\\ |\\ C:C(OH)R\end{array}$ bezw. $<\begin{array}{l}CO\\ |\\ CH.COR\end{array}$ und $<\begin{array}{l}COH\\ \|\\ COR\end{array}$ entstehen aus Camphermagnesiumbromid mit Fettsäureestern-Chloriden und -Anhydriden, Camphermagnesiumbromid gibt nach Grignard mit Aldehyden und Ketonen sekundäre und tertiäre Alkohole z. B. Camphermethylkarbinol $C_8H_{14}<\begin{array}{l}CO\\ |\\ CH(OH)CH_3\end{array}$; Na-Campher + Aldehyde geben Kondensationsprodukte wie z. B. den Benzylidencampher $C_8H_{14}<\begin{array}{l}CO\\ |\\ C:CHC_6H_5\end{array}$; von Estern zweibasischer Säuren reagiert Oxalester mit Campher: mittels $NaOC_2H_5$ entsteht Campheroxalsäureester.

b) Reaktionsfähigkeit der CO-Gruppe im Campher: Mit $NaHSO_3$ keine Verbindung; Campherphenylhydrazon, $Kp._{17}$ 210°; Campheroxim F. 118°, Kp. 249°, gibt bei der Reduktion Bornylamin, das auch durch Erhitzen von Campher mit Ammoniumformiat entsteht, mit KOBr Bromnitrocamphan $C_8H_{14}\left<\begin{array}{l}C(Br)NO_2\\ |\\ CH_2\end{array}\right.$; durch Erhitzen oder durch verd. H_2SO_4 oder Acetylchlorid entsteht α-Campholensäurenitril,

$$\begin{array}{lll}CH_2 & CH & CH_2\\ & C(CH_3)_2 & \\ CH & C— & CH_3\ CN\end{array}$$

durch Einwirken stärkerer Säuren (konz. HJ) β-Campholensäurenitril:

$$\begin{array}{lll}CH_2—C & & CH_2\\ & CCH_3 & \\ CH_2 & C:(CH_3)_2CN & \end{array}$$

3. β-Campher (35) (Epicampher), F. 185°, Kp. 214° $[\alpha]_D$ —58.24° entsteht aus β-Campherimin $C_8H_{14}\left<\begin{array}{l}CH_2\\ \\ C:NH\end{array}\right.$, das aus dem Azid der Bornylencarbonsäure durch die Curtiussche Umlagerung entsteht, durch Einwirkung von Säuren; ferner aus Bornylenhydroxamsäure $C_{10}H_{15}$.C(OH):NOH, F. 136, beim Erhitzen neben NH_3; das Natriumsalz der Hydroxamsäure gibt mit Toluol-p-sulfonylchlorid einen Sirup, aus dem nach Zusatz von Salzsäure Epicampher durch Wasserdampfdestillation erhalten wird. Oxim F. 103, Semicarbazon F. 238°, Epiborneol, F. 182 bis 183°, 2 Isonitrosoepicampher entstehen aus Epicampher, Isoamylnitrit + $NaNH_2$; beide geben mit CH_2O + HCl Campherchinon, mit konz. H_2SO_4 Camphersäureamid F. 244°. Aminoepicampher F. 168 bis 170°, Epicamphercarbonsäure F. 122°.

4. Fenchon (36), d-Fenchon und l-Fenchon, F. 5 bis 6°, Kp. 192 bis 193°, $[\alpha]_D$ ± 72°. d-Fenchon kommt neben Campher im Fenchelöl vor, l-Fenchon im Thujaöl neben Pinen (15), Thujon (29) und Borneolestern (cf. 53). Uebergänge des Fenchons: P_2O_5 → Methyl-1-isopropyl-3-benzol (m-Cymol); konz. H_2SO_4 → Acetyl-1-dimethyl-3,4-benzol; Abbau durch Oxydation: $KMnO_4$ → Dimethylmalonsäure, Essigsäure und Oxalsäure; HNO_3 (erst in der Hitze): Dimethyltricarballylsäure HOOC.C$(CH_3)_2$.CH(COOH).CH_2.COOH, Dimethylmalonsäure $(CH_3)_2C(COOH)_2$ und Isocamphoronsäure HOOC.C$(CH_3)_2$.CH(CH_2COOH) Abbau durch Erhitzen mit Aetzkali auf ca. 230°

· Fencholsäure, 1-Methyl-3-isopropylcyclopentancarbonsäure-1, F. 19°, Kp.$_{17}$ 152°.







ihr Amid aus Fenchon beim Erhitzen mit $NaNH_2$ in Benzollösung. Fenchon + Br → $C_{10}H_{16}OBr_2$ und Monobromfenchon $C_{10}H_{15}OBr$; Na + CO_2 → α- u. β-Fenchocarbonsäure; es läßt sich nicht mit Benzaldehyd und Ameisensäureester kondensieren. Reaktionsfähigkeit der CO-Gruppe im Fenchon: $NaHSO_3$ und $C_6H_5NHNH_2$ wirken nicht ein; Fenchonsemicarbazon, F. 183° (aktiv), F. 172 (inaktiv) bildet sich sehr langsam; Fenchonoxim $C_{10}H_{16}$:NOH, F. 165°, (aktiv), 159° (inaktiv), Kp. 240, ist mit H_2O-Dämpfen flüchtig, sublimiert leicht, bei der Reduktion Fenchylamin (luftbeständiges Nitrit) beim Kochen mit verd. H_2SO_4 → α-Fenchonitril neben β-Fenchonitril (auch aus Fencholensäureamid oder β-Isofenchonoxim mit P_2O_5), die Nitrile geben α- und β-Fencholensäure, die nicht ineinander umgewandelt werden können; γ-Fencholensäure, aus Bromfenchon + alk. Kalilauge, geht leicht in die α-Säure über. Fenchon gibt bei der Reduktion unter gleichzeitigem Wechsel der Drehungsrichtung d- bezw. l-Fenchylalkohol und Fenchonpinakon.

5. **Isofenchon.** Kp. 201, erstarrt bei starkem Abkühlen zu einer campherartigen Masse. Synthetisch gewonnenes Fenchen gibt mit Alkohol oder Eisessig-H_2SO_4 Isofenchylalkohol, der mit CrO_3 Isofenchon gibt. Es besitzt im Gegensatz zum Fenchon die Gruppe —CO—CH_2—. Abbau durch $KMnO_4$ → Dicarbonsäure Isofenchocamphersäure $C_{10}H_{16}O_4$, F. 159° (aktiv), 175° (inaktiv), die mit Camphersäure und Camphencamphersäure isomer ist; Abbau durch Erhitzen mit Kali → Isofencholsäure $C_{10}H_{18}O_2$ F. 34°. Monobromisofenchon F. 57°, Isofenchonoxim, F. 82° (aktiv), 133° (inaktiv).

Terpen-Alkohole $C_{10}H_{17}OH\left(C_{10}H_{16}{H \atop OH}\right)$.

A. Olefinische Terpenalkohole $C_{10}H_{17}OH$.

1. Geraniol (37), Kp.$_{17}$ 120 bis 122, ist der am weitesten verbreitete Terpenalkohol, bildet den alkoholischen Hauptbestandteil von Geraniumöl, Rosenöl, Pelargoniumöl, Palmarosaöl, Lemongrasöl. Zur Abscheidung dient seine kristallinische $CaCl_2$-Verbindung, optisch inaktiv; sein Aldehyd ist das Citral-a; $KHSO_4$ gibt Anhydrogeraniol $C_{10}H_{16}$, das 6 Atome Br addiert. Geraniolester → konz. H_2SO_4 → Cyclogeraniol (s. Cyclocitral S. 1062).

2. Nerol, Kp. 225, wahrscheinlich ein dem Geraniol stereoisomerer Alkohol, kommt vor im Neroli-, Petitgrain-, Bergamott- und Linaloëöl, teils in freiem Zustande, teils in Form von Estern; bildet keine feste $CaCl_2$-Verbindung; sein Aldehyd ist Citral-b.

3. l-Linalool (38) (Licareol), Kp. 197 bis 199°, im Linaloëöl aus Licari kanali, Lavendelöl, Bergamottöl, Limettöl, Origanumöl u. a.; d-Linalool, (Coriandrol) im Corianderöl, Pomeranzenöl und Orangenblütenöl.

Charakterisierung: Diese Alkohole geben bei der Reduktion 2,6Dimethyloctan, mit verd. H_2SO_4 → inaktives Terpinhydrat (S. 1072); Ameisensäure oder Eisessig + H_2SO_4 → α-Terpineol (S. 1069), dabei Linalool ⇄ (Isomerisation) Geraniol; bei energischer Einwirkung der Mittel entstehen Terpinolen (5) und Terpinen (S. 1058); die Oxydation der Terpenalkohole zu Methylheptenon $(CH_3)_2C:CH.CH_2.CH_2.CO.CH_3$ gab Aufschluß über ihre Konstitution.

B. Monozyklische Terpenalkohole $C_{10}H_{17}OH$ (Menthenalkohole)

liefern mit $KMnO_4$ dreisäurige Alkohole.

1. Δ^2 p-Menthenol-1 (39), Kp.$_{10}$ 92°, aus Δ^2-Isopropylcyclohexenon-1 + CH_3MgJ; geht unter H_2O-Verlust in α-Phellandren über.

2. Terpinenol-1, Δ^3 p-Menthenol-1 (40), Kp. 209, im Vorlauf des Handelsterpineols, aus Δ^3-Isopropyl-4-cyclohexenon-1 + CH_3MgJ.

3. γ-Terpineol (41), $\Delta^{4(8)}$, p-Menthenol-1, F. 69°, aus Tetrahydrodipentribromid $C_{10}H_{17}Br_3$ mit Zn + Eisessig; mit NOCl blaues Nitrosochlorid.

4. β-Terpineol (42), $\Delta^{8(9)}$, p-Menthenol-1, F. 32°, Kp. 210°, durch Oxydation → 1, 8, 9-Trioxyhexahydrocymol → Methyl-1-acetyl-4-cyclohexanol-1.

Synthese: $CH_2.CH_2.CO.CH_2.CH_2.CH.COOC_2H_5$, d-Ketohexahydrobenzoësäureäthylester, → $MgJCH_3$ → CH_2 $CH_2.CO.CH_2.CH_2.CH.C(CH_3)_2OH$ und $CH_2.CH_2.CO.CH_2.CH_2CH.C(CH_3):CH_2$ Isopropenyl-p-Ketohexamethylen → $MgJCH_3$ → $CH_2.CH_2.C(CH_3)OH.CH_2.CH_2.CH.C(CH_3):CH_2$, β-Terpineol.

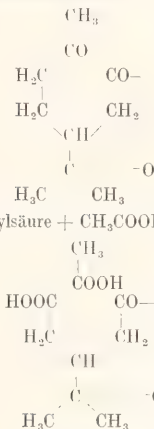
5. Dihydrocarveol (43), $\Delta^{8(9)}$ p-Menthenol-2, Kp. 224, optisch aktiv, riecht wie Terpineole, kommt im Kümmelöl vor, bildet sich bei der Reduktion von Carvon; sein Xanthogensäuremethylester gibt bei der trockenen Destillation d-Limonen (S. 1059).

6. Isopulegol (44), $\Delta^{8(9)}$ p-Menthenol-3, Kp.$_{13}$ 91°, aus Citronellal (S. 1071) durch Isomerisation. Oxydation → Isopulegon (S. 1064).

7. Terpinenol-4 (45), Δ^1 p-Menthenol-4, Kp. 212, findet sich als d-Terpinenol im

Cardamomen- und Majoranöl; es entsteht aus Sabinen (12) und Thujen (13, 14) mit verd. H_2SO_4; Bildung aus Terpinen siehe α-Terpinen (S. 1058). Mit H_2SO_4 → Terpinenterpin, das mit wässeriger $(COOH)_2$ i-Terpinenol-4 gibt; $KMnO_4$ → 1, 2, 4-Trioxyhexahydrocymol.

8. α-Terpineol (46), Δ^1 p-Menthenol-8, F. 35° (inaktiv), 37 bis 38 (aktiv), bildet mit β-Terpineol das für Parfümeriezwecke verwendete flüssige Terpineol (Geruch nach Maiglöckchen und Flieder), das aus Terpinhydrat (S. 1072) durch Wegnahme zweier Mol H_2O mittels H_2SO_4 entsteht. Bildung aus Linalool und Geraniol s. S. 1068. Sein Nitrosochlorid gibt beim Abspalten von HCl ein Oxyoxim, das mit verd. Säuren Carvon und Carvacrol gibt. $KMnO_4$ → 1, 2, 8-Trioxyhexahydrocymol, das dann Homoterpenylsäuremethylketon



und Terpenylsäure + CH_3COOH gibt:

α-Terpineol + $KHSO_4$ → Dipenten (8) + HCOOH oder $(COOH)_2$ → Terpinolen (5).

Synthese: Δ^1-Tetrahydro-p-toluylsäureester + CH_3MgJ.

9. Δ^3 p-Menthenol-8, F. 39, Kp.$_{14}$ 97°, aus CH_3MgJ + Δ^3-Tetrahydro-p-toluylsäureester oder Δ^3-Tetrahydro-p-acetyl-toluol.

C. Bizyklische Teropenalkhole $C_{10}H_{17}OH$.

I. Sabinan- oder Tanacetangruppe.

1. Sabinenhydrat, Methylsabinaketol, F. 39°, Kp. 195 bis 201°, aus Sabinaketon $C_9H_{14}O$ + $MgJCH_3$ neben α-Terpinen (2); Eisessig-HBr → Terpinendibromhydrat; verd. H_2SO_4 → optisch aktives Terpinenol-4 (45) und Terpinenterpin (S. 00).

2. Thujylalkohol, Tanacetylalkohol, Kp.$_{13}$ 92,5, durch Reduktion von Thujon (29), kommt im Wermutöl frei oder in Form von Estern vor.

3. Dihydroumbellulol, Kp.$_{10}$ 90°, aus dem Keton-Umbellulon $C_{10}H_{14}O$ (S. 1076), durch Reduktion, gibt mit CrO_3 Dihydroumbellulon $C_{10}H_{16}O$ (S. 1065).

II. Carangruppe: Alkohole $C_{10}H_{17}OH$ fehlen.

III. Pinangruppe: Alkohole $C_{10}H_{17}OH$.

1. Pinenhydrat (51), Methylnopinol, F. 59°, Kp. 205°, riecht nach Campher; bildet sich aus $MgJCH_3$ + Nopinon $C_9H_{14}O$ (S. 1073); verd. H_2SO_4 → optisch aktiv. α-Terpineol (46) und Terpinhydrat, Eisessig-HCl → Dipentendihalogenide; mit PCl_5 → $C_{10}H_{16}$ HCl, Kp.$_{13}$ 97 bis 105, das das Pinenchlorhydrat darstellt.

2. Pinocampheol, Kp. 218 aus Pinocamphon (32) durch Reduktion; sein Xanthogensäuremethylester, F. 61°, gibt beim Erhitzen α-Pinen (15).

IV. Camphangruppe: Alkohole $C_{10}H_{17}OH$.

1. Borneol (53) Borneocampher, Camphol F. 203°, Kp. 212°. d-Borneol in Dryobalanops Camphora in Borneo und Sumatra, im Rosmarinöl usw, l-Borneol und i-Borneol im Baldrianöl (Baldriancampher) und im ätherischen Oel von Blumea balsamifera (Ngaï-Campher). In Koniferennadelölen in Form von Borneolfettsäuren-(essigsäure)estern. Es sublimiert wie der Japancampher, riecht gleichzeitig campher- und pfefferartig. Künstliche Gewinnung 1, durch Reduktion von Campher (34) mit Na und Alkohol neben Isoborneol 2, aus Pinenchlorhydrat (Bornylchlorid), wenn dessen Mg verb. mit O reagiert. 3, Ester aus Pinen (15) und organischen Säuren. Oxydation — ohne Aenderung der Drehungsrichtung, Campher; $KHSO_4$ oder $ZnCl_2$ → schwer Camphen (17). Bornylisovalerianat (Bornyval) im Baldrianöl; Bornylsalicylat, (Salit) Antineuralgikum. Das Methylxanthogenat gibt d- und l-Bornylen, das auch aus Bornyljodid + alk. Kali entsteht.

2. Isoborneol, F. 212°. Dem Borneol stereoisomer, auch aus Campher durch Reduktion gebildet, aus Campherchlorhydratmagnesium + O; Oxydation → mit Aenderung der Drehungsrichtung : Campher . Na → Borneol; $KHSO_4$ oder $ZnCl_2$ → leicht Camphen (17).

3. Camphenhydrat F. 150°, Kp. 205°, aus Camphenchlorhydrat + Kalkmilch, riecht schimmel- und mentholartig, geht leicht in Camphen (17) über.

4. Methylcamphenilol (54), F. 118°, Kp. 205°, aus Camphenilon (S. 1073) $C_9H_{14}O$ + CH_3MgJ; mit Eisessig + H_2SO_4 → Camphen.

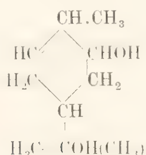
5. Fenchylalkohol (55), F. 45, Kp. 201°, riecht unangenehm moderartig. L-d-Fenchylalkohol $[\alpha]_D$ + 10° 36′ aus l-Fenchon, D-l-Fenchylalkohol $[\alpha]_D$—10° 35′ aus d-Fenchon,

i-Fenchylalkohol ist im Jellow Pine Oil von Pinus palustris und bildet sich u. a. bei der Hydratisierung des β-Pinens. Oxydation → Fenchon; — H_2O → Fenchen.

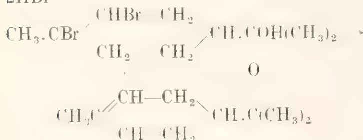
6. Isofenchylalkohol, F. 62°, Kp.$_{13}$ 98°, sein Acetat entsteht aus Fenchen mit Eisessig-H_2SO_4. Oxydation → Isofenchon.

Wie die Terpenketone $C_{10}H_{16}O$, Terpenalkohole $C_{10}H_{16}HOH$ Terpen-α-β-glycole (oxyalkohole) $C_{10}H_{16}(OH)_2$, so soll auch ein 2.8 Glycol $C_{10}H_{16}(OH)_2$, sein Anhydrid $C_{10}H_{16}O$ und das Superoxyd Askaridol $C_{10}H_{16}O_2$ im Anschluß an die Terpene $C_{10}H_{16}$ behandelt werden:

Pinolhydrat Sobrerol

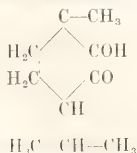


Δ^6 oxy-2-8-p-Menthen, ist in 3 Modifikationen bekannt, F. 150°, d-, l-, $[\alpha]_D \pm 150°$, [d+l]; die aktiven entstehen aus rechts und linksdrehendem Terpentinöl durch den O der Luft im Sonnenlicht. $C_{10}H_{16}(OH)_2Br_2$, F. 131°, $C_{10}H_{16}(OH)_4$ Sobrerythrit, F. 156°. Sein Anhydrid ist das Oxyd **Pinol** $C_{10}H_{16}O$, Kp. 183°, optisch-aktiv, entsteht aus den 3 Pinolhydraten mit verd. H_2SO_4 und aus α-Terpineoldibromid unter Abspaltung von 2HBr



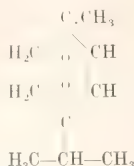
Pinoldibromid $C_{10}H_{16}Br_2O$ + HBr → Pinoltribromid $C_{10}H_{17}Br_3O$ — HBr → Isopinoldibromid, das mit Kali i-Carvon, durch Reduktion das Keton $C_{10}H_{16}O$ Pinolon gibt.

Das 2-oxy-Δ^1 p-Menthenon-3, der Buccocampher, $C_{10}H_{16}O_2$, F. 84°, Kp.$_{10}$ 110°



möge hier Erwähnung finden: Vorkommen in den Buccoblättern; mit HCl Thymol und wenig Carvacrol; Ozon → α-Isopropyl-γ-acetbuttersäure. Synthetisch aus Oxymethylenmenthon + Ozon.

Dem Superoxyd Askaridol $C_{10}H_{16}O_2$, dem wirksamen Bestandteil des amerikanischen Wurmsamenöls, wird folgende Formel zugeschrieben:



Bei der Reduktion gibt es Terpinenterpin (S. 1072).

II. Dihydroterpene ($C_{10}H_{18}$, $C_{10}H_{18}O$, $C_{10}H_{19}OH$).

I. Dihydroterpen-Kohlenwasserstoffe $C_{10}H_{18}$.

A. Olefinische Terpenkohlenwasserstoffe $C_{10}H_{18}$.

1. Linaloolen (56), Kp. 165 bis 168°, entsteht durch Reduktion von Linalool $C_{10}H_{17}OH$.

B. Monozyklische Terpenkohlenwasserstoffe $C_{10}H_{18}$.

1. Carvomenthen (57), Δ^1 p-Menthen, Kp. 175°, entsteht aus Tetrahydrocarveol (71) (Carvomenthol) durch Abspaltung von H_2O, aus α-Phellandren (6) durch Reduktion, aus Limonen (8) monochlorhydrat und dem — aus Terpinen (2, 3, 4) und Sabinen (12) durch Anlagerung von ClH gewonnenen — Terpinenmonochlorhydrat durch Reduktion. $C_{10}H_{18}NOCl$, F. 87°.

2. Menthen (58), Menthomenthen, Δ^3 p-Menthen, Kp. 167°, entsteht aus Menthol (72) durch H_2O-Abspaltung, aus Menthylchlorid mittels Kaliumphenolat, oder aus $C_{10}H_{19}OCSSCH_3$ (Mentholmethylxanthogenat) durch trockne Destillation. i-Menthen aus dem — aus 1,4 Methylcyclohexanon + Isopropylmagnesiumjodid erhaltenen — Oxy-4-p-Menthan(oxy-4-p-Hexahydrocymol) durch Abspaltung von H_2O.

3. Dihydroterpinolen (59), $\Delta^{4(8)}$ p-Menthen, Kp. 173°, aus 1,4-Methylcyclohexanon + Zn + $BrC(CH_3)_2.COOR$: es entsteht zunächst Oxy-4-p-Hexahydrocymolcarbonsäure-8 und daraus durch H_2O und CO_2-Abspaltung das Menthen (aus 1,2 und 1,3 Methylcyclohexanon entstehen die entsprechenden o- und m-Menthene).

4. $\Delta^{8(9)}$ p-Menthen (60), Kp.$_{14}$ 54°, durch Reduktion von Isopulegolchlorid (44).

C. Bizyklische Terpenkohlenwasserstoffe $C_{10}H_{18}$.

I. Sabinan- oder Tanacetangruppe.

1. Sabinan (61), Thujan, Kp. 157, durch Reduktion von Sabinen, α- und β-Thujen mit H_2 bei Gegenwart von Pt schwarz.

II. Carangruppe fehlt.

III. Pinengruppe fehlt.

IV. Camphangruppe. Kohlenwasserstoffe $C_{10}H_{18}$.

1. Camphan (62), Dihydrobornylen, F. 153, Kp. 159, inaktiv, sublimiert leicht; entsteht aus Camphen- und Pinenhydrochlorid mit Na und Alkohol, oder durch Zerlegen ihrer Mg-Verbindungen durch H_2O.

2. Isocamphan (63), Dihydrocamphen, F. 63°, durch Reduktion von Camphen (17) mit molek. H_2 bei Gegenwart von Pt schwarz, durch Erhitzen von Isoborneol + Zn (53) auf 220°.

II. Dihydroterpenaldehyde und -ketone $C_{10}H_{18}O$.

A. Olefinische Terpenaldehyde $C_{10}H_{18}O$.

1. Rhodinal (64), l-Citronellal, Kp. 205 bis 208, im Java lemon olie, gibt mit Essigsäureanhydrid p-Menthon (67) das ihm isomer ist.

2. d-Citronellal (65), Kp. 205 bis 208, im Citronellöl, Melissenöl usw. geht leicht beim Aufbewahren oder durch Essigsäureanhydrid in ein Isomeres, das Isopulegol (44) über. Reduktion → d-Citronellol (69); Oxydation → Citronellsäure (Rhodinasäure).

B. Monozyklische Terpenketone $C_{10}H_{18}O$. Ketomenthane.

1. Tetrahydrocarvon (Carvomenthon) (66), p-Menthanon-2, Kp. 223°, durch Reduktion von Caron (31) und Carvon und Oxydation von Tetrahydrocarveol gewonnen. Oxydation → $CH_3.CO.CH_2.CH_2.CH(C_3H_7).CH_2.COOH$ β-Isopropyl-d-acetylvaleriansäure → Isopropylbernsteinsäure; Carosches Reagens → $CH_3.CH.(CH_2)_2.CH(C_3H_7)CH_2.CO.O$ ε-Lacton der Isoprophylheptanolsäure.

Benzylidentetrahydrocarvon, F. 175°, Semicarbazon, F. 174°, Oxim F. 104°, wird durch H_2SO_4 in ein Isoxim, das ε-Lactam der β-Isopropyl-ε-amidoheptansäure umgewandelt. Chlor und Brom treten an C-1 des p-Menthanons-2.

2. Menthon (67) p-Menthanon-3, Kp. 208°, im japanischen, amerikanischen und russischen Pfeffermünzöl, neben Menthol (72), dessen Estern, Menthen (58) und Limonen (8). l-Menthon $[\alpha]_D = -28°$, aus Menthol durch Oxydation, wird durch konz. H_2SO_4 in der Kälte in ein d-Menthon $[\alpha]_D = +93,2°$ umgelagert; d-Menthon $[\alpha]_D = +43° 66'$ ist im amerikanischen Poleiol von Hedeoma pulegioïdes gefunden. i-Menthon wurde synthetisch erhalten aus β-Methylpimelinsäureester, der durch intramolekulare Acetessigesterkondensation in Methyl-1-cyclohexanon-3-carbonester-4 übergeht; dieser wird isopropyliert und der Ketonspaltung unterworfen; aktives Menthon erhält man aus dem durch Hydrolyse von Pulegon gewonnenen Methyl-1-cyclohexanon-3 1. durch $NaNH_2$ + Isopropyljodid oder 2. durch Ueberführen in Methyl-1-cyclohexanon-3-oxalester-4, der durch CO-Abspaltung den Methyl-1-cyclohexanon-3-carbonester-4 gibt; dieser wird isopropyliert und der Ketonspaltung unterworfen; l-Rhodinal (64) isomerisiert sich durch Essigsäureanhydrid zu Menthon. M. + PCl_5 → 3-Chlorcymol; 1 Halogen → Halogen-4-Menthon, das unter Abspaltung von Halogenwasserstoff, Δ^4 p-Menthenon-3 gibt; 2 Halogen → z. B. 2,4 Dibrommenthon, das unter Abspaltung von 2 HBr Thymol (Methyl-1-isopropyl-4-phenol-3) gibt. M. + verd. HNO_3 → Nitromenthon, das zu Amidomenthon reduziert werden kann; HNO_2 → Nitrosomenthon; Oxymethylenmenthon wird zu Methyl-2-menthon reduziert, Benzyliden-menthon; M. + Na + CO_2 → Menthonmono- und -dicarbonsäure. M. + Reduktion mit Natrium → l-Menthol, mit Ammoniumformiat-Menthylamin; l-Menthonoxim F. 61°, Kp. 251° geht durch Beckmannsche Umlagerung in das ε-Lactam einer ε-Amidomethylisopropylcapronsäure über; beide Körper mit P_2O_5 → $CH_2:C(CH_3).(CH_2)_2.CH(C_3H_7).CN$ Menthonitril, das sich zur Menthonensäure verseifen läßt. Oxydation von Menthon → $CH(CH_3)_2.CO.(CH_2)_2.CH(CH_3).CH_2.COOH$: Oxomenthylsäure und β-Methyladipinsäure: $HOOC.(CH_2)_2CH(CH_3).CH_2.COOH$, mit Caroschen Reagens $CH(CH_3)_2.CH.(CH_2)_2.CH(CH_3).CH_2.CO.O$: ε-Lacton der Dimethyloctanolsäure.

III. Dihydroterpenalkohole $C_{10}H_{19}OH$.

A. Olefinische Terpenalkohole $C_{10}H_{19}OH$.

1. l-Citronellol (68), l-Rhodinol, $Kp._{15}$ 113 bis 114°, neben Geraniol (37) $C_{10}H_{17}OH$ in verschiedenen Rosen-, Geranium- und Pelargoniumölen; Oxydation → Rhodinal (64).

2. d-Citronellol (69), $Kp._{15}$ 113 bis 114°, im Java-Citronellöl, angenehm rosenartig riechendes Oel, ist wahrscheinlich bindungsisomer mit l-Citronellol; durch Oxydation → d-Citronellal (65), aus dem es durch Reduktion erhalten wird.

3. i-Citronellöl, i-Rhodinol, $Kp._{10}$ 110°, durch Reduktion der synthetisch erhaltenen Geraniumsäure: $(CH_3)_2C:CH(CH_2)_2.CO.CH_3 + BrCH_2COOR + Zn$ → $(CH_3)_2C:CH(CH_2)_2.C(CH_3)OH.CH_2.COOH$ → $(CH_3)_2C:CH(CH_2)_2.C(CH_3):CH.COOH$.

B. Monozyklische Terpenalkohole $C_{10}H_{19}OH$. Menthanalkohole $C_{10}H_{19}OH$.

1. p-Menthol-1 (70), $Kp._{17}$ 96 bis 100°, aus Jod-1-p-Hexahydrocymol (aus Carvomenthen (57) (Δ^1 p-Menthen) + JH) + feuchtem Ag_2O.

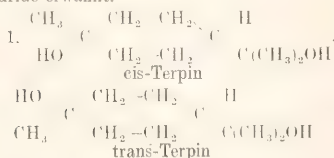
2. Carvomenthol (71), p-Menthol-2, Tetrahydrocarveol, Kp. 221 aus Tetrahydrocarvon (66), Carvenon (22) und Carvotanaceton (23) durch Reduktion; durch Reduktion von Carvacrol durch Ni und H entsteht ein Gemisch raz. Carvomenthole.

3. l-Menthol (72), p-Menthol-3, Menthacampher, F. 44°, Kp. 212°, Hauptbestandteil des Pfeffermünzöls aus Mentha piperita und Mentha arvensis var. piperascens. Es entsteht durch Reduktion von l-p-Menthon-3 (67), zu dem es auch oxydiert wird. Abspaltung von H_2O → Δ^3 p-Menthen (58). Reduktion → Hexahydrocymol, Oxydation → Oxomenthylsäure und β-Methyladipinsäure durch Reduktion von Thymol mit H + Ni entsteht ein Gemisch zweier razemischer Menthole, F. 25° und 49°. Isovaleriansäureester = Validol, gegen Seekrankheit, Chlormethylmenthyläther $C_{10}H_{19}O.CH_2Cl$ aus Menthol, Formaldehyd + HCl → Forman (Antiseptikum).

4. p-Menthol-4 (73), $Kp._{20}$ 100°, riecht schwach pfeffermünzartig; aus Jod-4-p-Hexahydrocymol (aus Δ^3 p-Menthen + JH) + feuchtem Ag_2O; auch aus 1,4 Methylcyclohexanon + Isopropylmagnesiumjodid; durch H_2O-Abspaltung → $\Delta^{4(8)}$ p-Menthen (59).

5. p-Menthol-8 (74), F. 36°, Kp. 207°, aus Hexahydro-p-toluylsäureester + CH_3MgJ.

Im Anschluß an die Ketone $C_{10}H_{18}O$ und Alkohole $C_{10}H_{18}{}^{OH}_{H}$ seien hier einige zweisäurige Alkohole $C_{10}H_{18}{}^{OH}_{OH}$ und ihre Anhydride erwähnt.

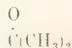


entstehen aus den cis- und trans-Dipentendihydrohalogeniden (1,8 Dihalogen-p-hexahydrocymolen), die sich auch aus ihnen mit Halogenwasserstoffsäuren bilden.

a) cis-Terpin, F. 104°, Kp. 258°, zieht leicht H_2O an und bildet das gut kristallisierende Terpinhydrat, F. 117°, $C_{10}H_{18}(OH)_2 + H_2O$. Dieses entsteht auch aus Terpentinöl mit verd. HNO_3 + Alkohol und aus Dipenten(8), d-Limonen(8), Terpineol, Cineol, den Linaloolen (56) und Geraniol (37) mit verdünnten Säuren. Synthese: 1,4 Cyclohexanoncarbonester + CH_3MgJ.

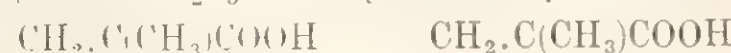
b) trans-Terpin, F. 156 bis 158°, Kp. 263 bis 265° verbindet sich nicht mit Wasser. Das dem cis-Terpin entsprechende Anhydrid ist das 1,8 Cineol (Eucalyptol) $C_{10}H_{18}O$. Kp. 176°.







campherartig riechende Flüssigkeit; findet sich im Oleum cinae, Wurmsamenöl von Artemisia cina, Cajeputöl, Eucalyptusöl, Rosmarinöl usw. HCl → Dipentendihydrohalogenide: P_2S_5 → Cymol; Oxydation →

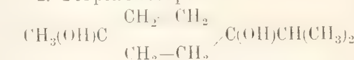






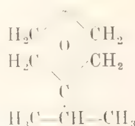
Cineolsäure, (I) die durch Erhitzen mit H_2O auf 160 bis 165° Cinensäure (II) gibt; aus deren Anhydrid entsteht bei der Destillation Methylheptenon: $(CH_3)_2C:CH.(CH_2)_2.CO.CH_3$.

2. Terpinenterpin



(1,4 oxytetrahydrocymol) F. 138°, Kp. 250°, entsteht durch verd. KOH, aus Terpinendichlorhydrat, in das es HCl zurückführt; aus Sabinen (12), Thujen (13, 14) und Terpinolen (5) bildet es verd. H_2SO_4. Erwärmen mit Oxalsäure führt es in 1,4 Cineol (Terpinencineol)





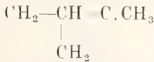
über. Kp. 173°, das mit BrH Terpinendibromhydrat gibt.

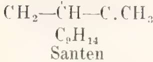
III. Tetrahydroterpene $C_{10}H_{20}$.

Von Tetrahydroterpenen $C_{10}H_{20}$ ist 1. das Hexahydrocymol (75), Kp. 169°, (im Harzöl), durch Reduktion von Terpinhydrat, Terpineol und d-Limonen gewonnen, und 2, das Tetrahydrofenchen, Kp. 160 bis 165°; aus Fenchon und Fenchylalkohol durch Erhitzen mit JH erhalten, zu nennen.

9. Niedere Homologe der Terpene und Campher. Einige niedere Homologe der Terpenkohlenwasserstoffe, -ketone und -alkohole.

Kohlenwasserstoff: C_9H_{14} Santen.





C_9H_{14}
Santen

Kp. 140⁰, im Verlauf des ostindischen Sandelholzöles, im sibirischen Fichtennadelöl usw., auch aus trizyklischer Teresantalsäure $C_{10}H_{14}O_2$ des Sandelholzöls mit H_2SO_4.

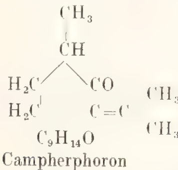
C_9H_{16} Geraniolen, aus der Geraniumsäure (S. 1074) durch Erhitzen, wird durch H_2SO_4 zu Cyclograniolen isomerisiert:





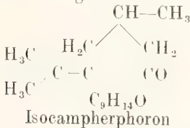
Ketone $C_9H_{14}O$.

1. a) Campherphoron, $Kp._{10}$ 83⁰, aus camphersaurem Kalk unter Aufrichtung der $CH_3.C—CH_3$-Brücke; aus 2-Methylcyclopentanon (+ $NaOC_2H_5$) + Aceton; in diese Komponenten zerfällt es beim Erhitzen mit KOH. Reduktion → Dihydrocamphorol $C_9H_{17}OH$, das zu Dihydrocamphoron (Dihydropulegenon) $C_9H_{16}O$ oxydiert werden kann. Letzteres ist synthetisch aus α-Methyl-α'-isopropyladipinsäure erhalten worden.



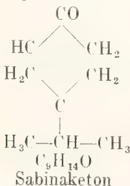
$C_9H_{14}O$
Campherphoron

1. b) Isocampherphoron, Kp. 203—205, aus 3-Methylcyclopentanon + $NaOC_2H_5$ + Aceton; Reduktion → Dihydroisokampherphoron $C_9H_{16}O$, das bei der Oxydation β-Methylglutarsäure gibt.



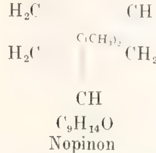
$C_9H_{14}O$
Isocampherphoron

2. Sabinaketon, Kp. 212⁰, Gewinnung aus Sabinen $C_{10}H_{16}$ (s. d.), mit H_2SO_4 wird es zu Δ^2 Isopropyl-4-cyclohexenon-1 isomerisiert.



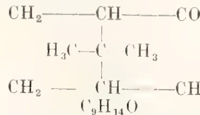
$C_9H_{14}O$
Sabinaketon

3. Nopinon, Kp. 209⁰, durch Oxydation von β-Pinen (16), durch H_2SO_4 zu Δ^2 Isopropyl-4-cyclohexenon-1 isomerisiert, dient zur Partialsynthese der α- und β-Pinens (15, 16) und Fenchens (19).



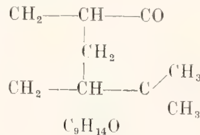
$C_9H_{14}O$
Nopinon

4. Fenchocamphorone, F. 110⁰ oder 63⁰, durch Oxydation von Oxyfenchensäuren (siehe Fenchen) erhalten.



$C_9H_{14}O$
Fenchocamphoron, nied. Homologe d. Camphers.

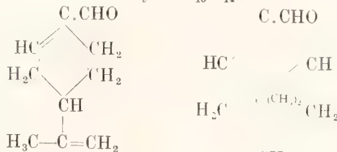
5. Camphenilon, F. 43⁰, $Kp._{12}$ 81⁰, dem Fenchon im Geruch und Verhalten ähnlich. Bildung aus Campher.



$C_9H_{14}O$
Camphenilon, nied. Homologe d. Fenchons.

6. Pulegenon s. S. 1064.

Aldehyde $C_{10}H_{14}O$.



d-Perillaaldehyd, Myrtenal

sind im falschen Campherholzöl entdeckte Aldehyde. (Ber. d. chem. Ges. 1911, S. 815.)

Ketone $C_{10}H_{14}O$.

1. Sylvecarvon, Semikarbazon 175⁰, aus Sylvestrennitrosochlorid $C_{10}H_{16}NOCl$ unter Abspaltung von HCl und durch Hydrolyse des Oxims.

1 $C_{10}H_{16}$ Myrcen

2 $C_{10}H_{16}$ α-Terpinen, $\Delta^{1,3}$ p-Menthadien

3 $C_{10}H_{16}$ β-Terpinen, $\Delta^{1(7),3}$ p-Menthadien

4 $C_{10}H_{16}$ γ-Terpinen, $\Delta^{1,4}$ p-Menthadien

5 $C_{10}H_{16}$ Terpinolen, $\Delta^{1,4(8)}$ p-Menthadien

6 $C_{10}H_{16}$ α-Phellandren, $\Delta^{2,6}$ p-Menthadien

7 $C_{10}H_{16}$ β-Phellandren, $\Delta^{1(7),2}$ p-Menthadien

8 $C_{10}H_{16}$ d- oder l-Limonen, [d + l]-Limonen (Dipenten), $\Delta^{1,8(9)}$ Menthadien

9 $C_{10}H_{16}$ $\Delta^{2,5}$ p-Menthadien

10 $C_{10}H_{16}$ $\Delta^{3,8}$ p-Menthadien

11 $C_{10}H_{16}$ Carvestren, Sylvestren, $\Delta^{1,8(9)}$ m-Menthadien

12 $C_{10}H_{16}$ Sabinen

13 $C_{10}H_{16}$ α-Thujen

14 $C_{10}H_{16}$ β-Thujen

15 $C_{10}H_{16}$ α-Pinen

16 $C_{10}H_{16}$ β-Pinen

17 [illegible] Camphen

18 [illegible] [illegible]

19 $C_{10}H_{16}$ Fenchen

20 $C_{10}H_{16}O$ Citral, Geranial

21 $C_{10}H_{16}O$ Sabinaketon, $\Delta^{1(7)}$ p-Menthenon-2

22 $C_{10}H_{14}O$ Carvenon, Carveol, Δ^{1} p-Menthenon-2

23 $C_{10}H_{16}O$ Carvotanaceton, Δ^{1} p-Menthenon-2

24 $C_{10}H_{16}O$ Dihydrocarvon, $\Delta^{8,9}$ Menthenon-2

25 $C_{10}H_{16}O$ Δ^{1} p-Menthenon-3

26 $C_{10}H_{16}O$ Δ^{4} p-Menthenon-3

27 $C_{10}H_{16}O$ Pulegon, $\Delta^{4,8}$ p-Menthenon-3

28 $C_{10}H_{16}O$ Isopulegon, $\Delta^{8,9}$ p-Menthenon-3

29 $C_{10}H_{16}O$ Thujon

30 $C_{10}H_{16}O$ Dehydroumbellulon

31 $C_{10}H_{16}O$ Caron

32 $C_{10}H_{16}O$ Pinocamphon

33 $C_{10}H_{16}O$ Camphenilanaldehyd

34 $C_{10}H_{16}O$ Campher

35 $C_{10}H_{16}O$ β-Campher, Epicampher

36 $C_{10}H_{16}O$ Fenchon

37 $C_{10}H_{17}OH$ Geraniol

38 $C_{10}H_{17}OH$ Linalool, Lavareol

39 $C_{10}H_{17}OH$ Δ^{1} p-Menthenol-1

40 $C_{10}H_{17}OH$ Terpinenol-4, Δ^{1} p-Menthenol-4

41 — $C_{10}H_{17}OH$ — γ-Terpineol — $\Delta^{4,8}$ p-Menthenol-1

42 — $C_{10}H_{17}OH$ — β-Terpineol — $\Delta^{8,9}$ p-Menthenol-1

43 — $C_{10}H_{17}OH$ — Dihydrocarveol — $\Delta^{8(9)}$ p-Menthenol-2

44 — $C_{10}H_{17}OH$ — Isopulegol — $\Delta^{8,9}$ p-Menthenol-3

45 — $C_{10}H_{17}OH$ — Terpinenol-4 — Δ^{1} p-Menthenol-4

46 — $C_{10}H_{17}OH$ — α-Terpineol — Δ^{1} p-Menthenol-8

47 — $C_{10}H_{17}OH$ — Δ^{3} p-Menthenol-8

48 — $C_{10}H_{17}OH$ — Sabinenhydrat — Methylsabinaketol

49 — $C_{10}H_{19}OH$ — Thujylalkohol — Tanacetylalkohol

50 — $C_{10}H_{19}OH$ — Dihydroumbellulol

51 — $C_{10}H_{17}OH$ — Pinenhydrat — Methylnopinol

52 — $C_{10}H_{17}OH$ — Pinocampheol

53 — $C_{10}H_{17}OH$ — Borneol, Camphol — Borneocampher

54 — $C_{10}H_{17}OH$ — Methylcamphenilol

55 — $C_{10}H_{17}OH$ — Fenchylalkohol

56 — $C_{10}H_{18}$ — Linaloolen

57 — $C_{10}H_{18}$ — Carvomenthen — Δ^{1} p-Menthen

58 — $C_{10}H_{18}$ — Menthen — Menthomenthen — Δ^{3} p-Menthen

59 — $C_{10}H_{18}$ — Dihydroterpinolen — $\Delta^{4,8}$ p-Menthen

60 — $C_{10}H_{18}$ — $\Delta^{8(9)}$ p-Menthen

61 — $C_{10}H_{18}$ — Sabinan

62 — $C_{10}H_{18}$ — Camphan — Dihydrobornylen

63 — $C_{10}H_{18}$ — Isocamphan — Dihydrocamphen

64 — $C_{10}H_{18}O$ — Rhodinal — l-Citronellal

65 — $C_{10}H_{18}O$ — d-Citronellal

66 — $C_{10}H_{18}O$ — Tetrahydrocarvon — p-Menthanon-2 — Carvomenthon

67 — $C_{10}H_{18}O$ — p-Menthon — p-Menthanon-3

68 — $C_{10}H_{19}OH$ — l-Citronellol — l-Rhodinol

69 — $C_{10}H_{19}OH$ — d-Citronellol

70 — $C_{10}H_{19}OH$ — p-Menthol-1

71 — $C_{10}H_{19}OH$ — Carvomenthol — p-Menthol-2

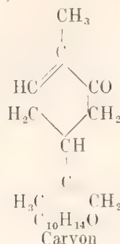
72 — $C_{10}H_{19}OH$ — p-Menthol-3 — l-Menthol

73 — $C_{10}H_{19}OH$ — p-Menthol-4

74 — $C_{10}H_{19}OH$ — p-Menthol-8

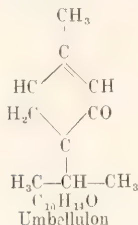
75 — $C_{10}H_{20}$ — p-Menthan — Hexahydrocymol

2. Carvon, s. S. 1063.



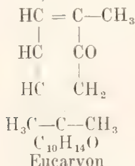
$C_{10}H_{14}O$
Carvon

3. Umbellulon, $Kp._{10}$ 93°, $[\alpha]_D$ −37°, in den Blättern des kalifornischen Lorbeers. Semikarbazon 242°; 280° → Thymol, weiteres unter Dihydroumbellulon $C_{10}H_{16}O$.



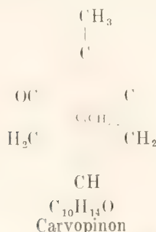
$C_{10}H_{14}O$
Umbellulon

4. Eucarvon, s. Caron S. 1065.



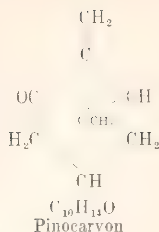
$C_{10}H_{14}O$
Eucarvon

5. Carvopinon, $Kp._{12}$ 95°, durch Erwärmen des Nitrosopinens (S. 1061), das als Oxim des Carvopinons angesehen werden kann, mit wässeriger Oxalsäure. NH_2OH → Nitrosopinen; Säuren → das isomere Carvon.



$C_{10}H_{14}O$
Carvopinon

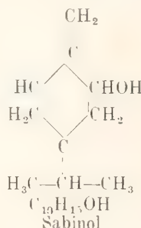
6. Pinocarvon, $Kp._{12}$ 85°, aus Pinocarveol $C_{10}H_{15}OH$, gibt mit $KMnO_4$ Pinsäure (S. 1061).



$C_{10}H_{14}O$
Pinocarvon

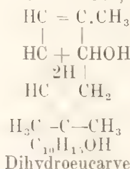
Alkohole $C_{10}H_{15}OH$.

1. Sabinol, Kp. 211, als Essigester im Sadebaumöl, oleum Sabinae; mit Zn-Staub erhitzt → Thujon; mit Na + Alkohol → Thujonalkohol $C_{10}H_{17}OH$; Abspaltung von H_2O → Cymol; Oxydation → Sabinglyzerin $C_{10}H_{15}(OH)_3$ und α-Thujaketonsäure (S. 1065).



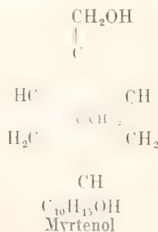
$C_{10}H_{15}OH$
Sabinol

2. Dihydroeucarveol, s. S. 1065.



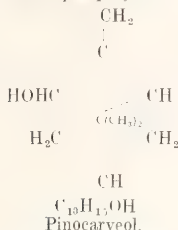
$C_{10}H_{15}OH$
Dihydroeucarveol

3. Myrtenol, Kp. 223° als Essigester im Myrtenöl; PCl_5 → $C_{10}H_{15}Cl$: Myrtenchlorid, das mit Na + Alkohol d-α-Pinen gibt; CrO_3 → $C_{10}H_{14}O$ Aldehyd Myrtenal; $KMnO_4$ → d-Pinsäure (S. 1061).



$C_{10}H_{15}OH$
Myrtenol

4. Pinocarveol, Kp. 215 bis 218°, vielleicht im Oel von Eucalyptus Globulus, aus Pinylamin mit HNO_2; CrO_3 → Pinocarvon $C_{10}H_{14}O$; $KHSO_4$ → p-Cymol.



$C_{10}H_{15}OH$
Pinocarveol.

10. Sesquiterpene und Polyterpene. Die Sesquiterpene $C_{15}H_{24}$ kommen in ätherischen Oelen häufig vor; sie sind dickflüssige Oele vom Siedepunkt 250 bis 280°; sie riechen schwach und wenig angenehm. Zu ihnen gehören: Cadinen, Caryophyllen, Santalen usw. Man unterscheidet 3fach ungesättigte monozyklische, 2fach unges. bizyklische und 1fach unges. trizyklische Sesquiterpene. Verbindungen der Zusammensetzung $C_{15}H_{24}O$ wie das Santalol und $C_{15}H_{26}O$ wie der Patchoulialkohol und das Cedrol sind Sesquiterpenkampher und -alkohole, die meist gut kristallisieren. Zur Charakterisierung der Sesquiterpene dienen die bei den Terpenen angewandten Mittel. Semmlers Arbeiten haben Fortschritte in der Konstitutionsermittelung gezeitigt. Polyterpene $(C_5H_8)_x$ sind gelb gefärbte dickflüssige Oele, die über 300° sieden; in ätherischen Oelen kommen sie selten, in Balsamen und Harzen häufig vor, sie bilden nur schwierig die zur Charakterisierung nötigen kristallinischen Additionsprodukte. Das Cholesterin ist mit ihnen nahe verwandt.

Literatur. **Aschan,** *Chemie der alizyklischen Verbindungen. Braunschweig 1905.* — **J. Bredt,** *Ueber die räumliche Konfiguration des Camphers. Leipzig 1905.* — **E. Gildemeister und F. Hoffmann,** *Die ätherischen Oele. Leipzig 1910.* — **Harries,** *Zusammenstellung in Meyer-Jacobson, Lehrbuch der organischen Chemie. Leipzig.* — **Richter-Anschütz,** *Organische Chemie. Bonn 1913.* — **F. W. Semmler,** *Die ätherischen Oele nach ihren chemischen Bestandteilen. Leipzig 1906—1907.* — **Schimmel und Co.,** *(Halbjahres-) Berichte.* — **O. Wallach,** *Terpene und Campher. Leipzig 1909.* — *Wallach-Festschrift. Artikel von* **A. Hesse,** *Die Entwickelung der Industrie der ätherischen Oele in Deutschland in den letzten 25 Jahren. Göttingen 1909.*

F. A. Kötz.

Terra rossa.

In den südeuropäischen Ländern bilden sich durch die Verwitterung Roterden (Terrae rossae), in Mitteleuropa Braunerden, in Nordeuropa Grauerden. Roterden und Braunerden sind nur durch den Wassergehalt des Eisenoxyds unterschieden, die Grauerden enthalten viele reduzierende Substanzen und darum nur Eisenoxydul (Ramann, Bodenkunde, 3. Aufl. 1911). Vgl. den Artikel „Verwitterung".

Terrassen.

Flußterrassen, Seeterrassen, Meeresterrassen. Vgl. die Artikel „Flüsse", „Seen" und „Meere".

Tertiärformation.

1. Name, Geschichte und allgemeine Gliederung. 2. Verbreitung. Entwickelung der Meere und Kontinente. Gebirgsbildung. 3. Petrographische Ausbildung. Eruptivgesteine. 4. Klima, Fauna und Flora. 5. Die einzelnen Stufen: Paleocän, Eocän, Oligocän, Miocän, Pliocän. 6. Nutzbare Minerale und Gesteine.

1. Name, Geschichte und allgemeine Gliederung. Der Name „Tertiärformation" ist im Anfang des vorigen Jahrhunderts von Cuvier und Brongniart gegeben worden und seitdem allgemein im Gebrauch geblieben, während die Ausdrücke Primär- und Sekundärformation im ursprünglichen Sinne kaum noch angewendet werden. Die Tertiärformation bildet zusammen mit der Quartärformation oder dem Diluvium und dem Alluvium die neozoische Formationsgruppe.

Die Kenntnis des Tertiärs ging von Frankreich aus, wo zuerst die Wirbeltier- und Conchylienfaunen im Pariser Becken und der Umgebung von Bordeaux die wissenschaftliche Erforschung angeregt hatten. Dann wurden die südenglischen und italienischen, ferner die Ablagerungen des Wiener Beckens, die deutschen Tertiärbildungen usw. beschrieben.

Eine allgemeine Gliederung versuchte zuerst Deshayes, der auf Grund des Studiums hauptsächlich der marinen Conchylienfauna feststellen zu können glaubte, das Alter einer Tertiärstufe lasse sich innerhalb seiner Fauna nach dem Prozentsatz von Arten erkennen, die noch mit lebenden Arten übereinstimmen. Charles Lyell schloß sich dem an und unterschied daraufhin drei Stufen:

Pliocän (πλείων = mehr, καινός = neu) mit 35 bis 50% noch lebender Arten.

Miocän (μείων = weniger) mit 17% noch lebender Arten.

Eocän (ἕως = die Morgenröte = Anfang) mit 3½% lebender Arten.

Dazu kam noch das Pleistocän (πλεῖστον am meisten) mit 90 bis 95% lebender Arten, das indessen nicht mehr zum Tertiär gehört, sondern das Diluvium oder die Quartärformation bildet.

Die Tatsache, daß die Tertiärfaunen mit der in der Jetztzeit lebenden Fauna nahe verwandt sind und auch übereinstimmende Formen enthalten, deren Zahl von den älteren nach den jüngeren Ablagerungen hin zunimmt, besteht zweifellos. Allein bestimmte Prozentzahlen festzustellen, ist kaum angängig. Keinesfalls können die Lyellschen Zahlen noch als zutreffend genommen werden, weil seit jener Zeit bedeutend mehr Arten bekannt geworden sind und weil doch auch die Stufen anderen Umfang erhalten haben und vermehrt worden sind. So ist z. B. der Grad der Verwandtschaft der jetzt als Miocän bestimmten Fauna mit der lebenden jedenfalls erheblich größer, als man aus Lyells Zahl schließen könnte. Dazu kommt, daß in neuester Zeit bei den Conchylien, besonders bei den Land- und Süßwasserformen, die für das jüngere Tertiär von besonderer Wichtigkeit sind, eine so weitgehende Trennung in Gattungen und Arten Platz gegriffen hat, daß die Ansichten darüber, welche Formen noch als übereinstimmend anzusehen sind, auseinander gehen.

In der Mitte des vorigen Jahrhunderts wies E. Beyrich nach, daß gegenüber Miocän und Pliocän das Eocän viel zu großen Umfang besitze und in sich wesentlich verschiedene Faunen einschließe. Er schaltete darum als weiteres Formationsglied das Oligocän (ὀλιγο- wenig, καινο- neu) zwischen Eocän und Miocän ein. Später in den siebziger Jahren schlug W. Schimper vor, auch die ältesten Schichten des ursprünglichen Eocäns mit einer charakteristischen Fauna als selbständige Stufe unter dem Namen Paleocän (παλαιός = alt) abzutrennen. Diese Forderung wurde durch A. v. Koenen Ende der achziger Jahre eingehend begründet.

Danach gliedert man das Tertiär wie folgt:

Jungtertiär (Neogen)	Pliocän Miocän
Alttertiär (Paläogen oder Eogen)	Oligocän Eocän Paleocän

Dieser althergebrachten und allgemein anerkannten Einteilung und Namengebung gegenüber versuchten in neuester Zeit Renevier und nach ihm E. Haug (Traité de Géologie 1907 bis 1912) eine teilweise abweichende Gliederung mit anderen Namen einzuführen, wie folgt:

Néogène		
Groupe Néogène supérieur (Néoméditerranéen)		Astien Plaisancien
		Sahélien = Pontien
Groupe Néogène moyen (Mésoméditerranéen)	Vindobonien	Sarmatien Tortonien Helvétien
Groupe Néogène inférieur (Eoméditerranéen)		Burdigalien Aquitanien
Nummulitique		
Groupe Néonummulitique (Tongrien, Oligocène)		Chattien Rupélien Lattorfien
Groupe Mésonummulitique (Parisien, Éocène s. str.)		Ludien Bartonien Auversien Lutétien
Groupe Éonummulitique (Suessonien, Paléocène)		Londinien Thanétien Montien.

Während sich das „Nummulitique" mit dem Paläogen und die drei Stufen Néo-, Méso- und Éonummulitique mit Oligocän, Eocän und Paleocän decken, weicht die Dreiteilung des Neogens von der althergebrachten Gliederung ab. Haug begründet sie damit, daß das Miocän gegenüber dem Pliocän zu großen Umfang besitze. In seiner Gliederung entspricht daher das Néogène supérieur dem Pliocän, zu dem aber die meisten Geologen auch das Pontien hinzurechnen, während das Néogène moyen und inférieur zusammen das Miocän umfassen. Das ist nicht glücklich und es ist kaum zu erwarten, daß diese Haugsche Einteilung die ältere zu verdrängen geeignet ist. Die Mächtigkeit der miocänen Schichten überragt allerdings lokal diejenige des Pliocäns mehr oder weniger. Aber dieser Umstand allein genügt nicht, denn nach der Fauna, insbesondere nach der Conchylienfauna, die doch für die Gliederung in den Vordergrund zu stellen ist, kann man unmöglich eine Zerlegung des bisherigen Miocäns in zwei selbständige Stufen rechtfertigen; sie wird sich auch in Frankreich nicht durchführen lassen. In keinem Falle könnte diesen beiden Néogène-Faunen gegeneinander die gleiche Selbständigkeit zuerkannt werden, wie sie den Faunen der Stufen des Paläogens, also dem Oligocän gegenüber dem Eocän und diesem gegenüber dem Paleocän, zukommt.

Die Namen für die Unterabteilungen rechts in der Haugschen Tabelle wurden zuerst von Ch. Mayer-Eymar, D'Orbigny u. a. eingeführt. Sie wurden sehr oft verändert und ergänzt und namentlich in Frankreich und in Belgien sind immer weitere hinzugefügt worden. Sie haben in der deutschen Geologie kaum Eingang ge-

funden, werden aber in Frankreich, Belgien und auch in der Schweiz angewandt. Die in den verschiedenen Tertiärgebieten mit derartigen, manchmal auch mit dem gleichen Namen bezeichneten Schichtengruppen decken sich zeitlich nicht immer genau und dadurch ist manche Verwirrung entstanden, wie ebenso dadurch, daß für die gleiche Stufe von verschiedenen Autoren und selbst für dasselbe Gebiet verschiedene Namen angewendet werden. Viele solcher Lokalnamen bezeichnen nur eine bestimmte Facies.

2. Verbreitung. Entwickelung der Meere und Kontinente. Gebirgsbildung. Die Verbreitung der tertiären Ablagerungen weicht erheblich von derjenigen der Kreidebildungen ab. Mit dem Ausgang der letzteren Periode traten beträchtliche Bewegungen in der Erdrinde ein, deren Folge das Emportauchen der großen Kontinentalsockel war. Sie dauerten unter wiederholten Hebungen und Senkungen einzelner Teile während der ganzen Periode an und führten allmählich zur Ausgestaltung der heutigen Kontinente und Meere. Die Grenze zwischen den Ablagerungen der obersten Kreidezeit und den untersten Tertiärbildungen ist in Europa fast überall scharf und durch Transgressionsfläche bestimmt; anderwärts, so im östlichen Rußland, in Tunis, Aegypten und Indien ist in marinen Schichten auch konkordante Ueberlagerung ohne Lücke beobachtet.

Zwischen Eurasien und Afrika ist das heutige Mittelländische Meer der kleine erhalten gebliebene Teil eines alten, großen, mit dem Namen der „Thetys" bezeichneten Mittelmeeres, das sich auch noch während des älteren Tertiärs vom Atlantischen Ozean durch Südasien bis in das Malaiische Gebiet ausdehnte. Es stand während des Eocäns und Oligocäns mit den nordischen Meeren durch breitere oder schmälere Arme in Verbindung und griff auch noch zur Miocänzeit in zahlreichen Buchten weit in die heutigen Kontinente ein. Ueber die einstige Ausdehnung der Meere und ihrer Buchten geben die großen Tertiärbecken Aufschluß: z. B. in Europa das aquitanische Becken, das sich vom Golf von Biscaya nach dem Mittelmeere erstreckte und im jüngeren Tertiär auch das Loirebecken umfaßte; das Anglogallische Becken, zu dem die Londoner, Pariser und Brüsseler Tertiärgebiete gehören; das Mainzer Becken, durch das im Oligocän eine Verbindung des Mittelmeeres durch die Rheinsenke und Wetterau mit dem nordischen Meer bestand. Das Wiener Becken stand noch im Miocän in Verbindung mit dem Pannonischen Becken und den östlichen Meeren und nach Westen wurde es durch einen Meeresarm am Nordrande der heutigen Alpen entlang mit dem Rhônebecken und dem westlichen Mittelmeer in Verbindung gebracht. Auch auf der Südseite der Alpen war das nördliche Italien vom Meere größtenteils überflutet. Andererseits bestanden Kontinentalverbindungen, die für die Ausbreitung der Tier- und Pflanzenwelt von Bedeutung waren. So war der nordamerikanische Kontinent über die Behringsstraße und Alaska mit Nordasien und über Grönland, Island, Irland und England mit Europa verbunden. Weitere Landverbindungen dürfen wir zwischen Indien und Afrika, sowie zwischen Ostasien und Australien vermuten.

Während der Tertiärzeit vollzog sich die Erhebung der jungen Faltengebirge der Erde. Sie begann schon mit dem Ausgange der Kreidezeit, erreichte in der mittleren Tertiärzeit die größte Intensität und klang dann ab, ohne sich indessen während des Diluviums und bis in die heutige Epoche hinein ganz zu verlieren. Es wurden infolge Zusammenschrumpfens der Erdrinde unter tangentialem Druck, der Faltungen, Verwerfungen, Aufpressungen und Ueberschiebungen zur Folge hatte, und nach der Anschauung vieler neueren Geologen teilweise auch unter Mitwirkung eruptiver Kräfte die höchsten Gebirge der Erde emporgestaut, also Atlas, Sierra Nevada, Pyrenäen, Alpen, Karpathen, Apennin und Balkangebirge, Himalaja und ferner das nordamerikanische Felsengebirge, die südamerikanischen Anden, die japanischen Gebirgsketten usw. (Fig. 1). Allein auch außerhalb der Hochgebirge äußerten sich die gebirgsbildenden Kräfte über große Gebiete auf den Kontinenten, besonders in manchen Mittelgebirgsländern, nicht so durch Auffaltung als durch Mulden- und Sattelbildungen, Entstehung von Spalten und Verwerfungen, Aufrichtung, Aufpressung und Verschiebung großer und kleiner Schollen. In den Hochgebirgen sind ältere Tertiärschichten bis zu mehreren tausend Metern Meereshöhe emporgepreßt, in Gräben innerhalb der Kontinente sind sie hunderte von Metern gegen älteres Gebirge in die Tiefe gesunken.

3. Petrographische Ausbildung. Eruptivgesteine. Die petrographische Ausbildung der Ablagerungen der Tertiärformation ist außerordentlich wechselvoll. Infolge der lebhaften tektonischen Bewegungen in der Erdrinde, die immer wieder Veränderungen in der Verteilung von Wasser und Land und Verschiebung der Küstenlinien verursachten, drang das Meer infolge von Senkung des Landes während eines Abschnittes in Armen oder Buchten weit in die Kontinente vor, um sich nach kürzerer oder längerer Dauer wieder zurückzuziehen, wobei vielfach Brackwasser- oder Binnenseen erhalten blieben.



Fig. 1. Verbreitung der tertiären Faltengebirge. Nach Neumayr.

Solcher Wechsel, der die Aufeinanderfolge petrographisch sehr verschiedenartiger Ablagerungen verursachte, hat sich in vielen Gebieten mehrmals wiederholt. Indessen dürften solche Oszillationen immer nur die Sockel der größeren Landmassen betroffen haben. Es ist nicht anzunehmen, daß jemals wirkliche Tiefseegebiete über den Meeresspiegel aufgestiegen sind. Man trifft infolgedessen unter den Sedimenten der Tertiärformation keine ausgesprochenen Tiefseeablagerungen an. Manche feinen Tone und Mergel mögen wohl in ruhigen Buchten, die Nummulitenkalke vielleicht in etwas größerer Küstenferne, aber doch in der Flachsee entstanden sein, Tiefseebildungen sind es nicht. Auf dem Festlande haben sich in den Niederungen Binnenseen und Sümpfe entwickelt und in der jüngeren Tertiärzeit haben auch Flußablagerungen weite Verbreitung erlangt.

Die Mächtigkeit der gesamten Tertiärschichten ist sehr groß, doch kann man eine Zahl dafür auch nicht annäherungsweise angeben, weil die Ablagerungen in ihrer Gesamtheit nie übereinander lagern und gleichalterige Stufen an verschiedenen Stellen in sehr wechselnder Dicke zum Absatz gekommen sind. Unter den Gesteinen herrschen als Küsten- und Festlandsbildungen grobe Gerölle und feste Konglomerate, Kiese und Sande, mürbe und feste Sandsteine; ferner sandige Tone, Tone und Mergel; auch Schiefertone und Schiefer kommen vor. Weitverbreitet sind Kalksteine von mürben Steinmergeln, Breccien und Oolithen an bis zu dichten kristallinen, harten Gesteinen. Ferner finden sich Gips, Steinsalz, Kohlen, bituminöse Stoffe und Petroleum.

Infolge der Vorgänge, die im Zusammenhang mit der Gebirgsbildung stehen, setzte während der Tertiärzeit eine lebhafte Eruptivtätigkeit ein, die ihren Höhepunkt während der Miocänzeit erreichte, aber bis in die heutige Epoche fortdauert. Es entstanden große und kleine Vulkangebirge, z. B. Vogelsberg, Rhön, Kaiserstuhl, das böhmische Mittelgebirge, Euganeen usw. Sind auch die ursprünglichen Krater und lockeren Auswurfsmassen nur stellenweise erhalten, so kennen wir doch eine Fülle von Ergußgesteinen aus dieser Zeit, so: Quarztrachyte und Trachyte, Phonolithe, Quarzandesite und Andesite, Trappbasalte und Basalte usw., die sich in Kuppen und Decken über tertiäre oder auch unmittelbar über ältere Gesteine ausgebreitet haben oder sie in Gängen durchsetzen. Nach neueren Forschungen glaubt man den Beweis gefunden zu haben, daß in den Faltengebirgen z. B. in den Pyrenäen und Anden auch körnige Tiefengesteine auftreten, denen man tertiäres Alter zusprechen muß, die eine kräftige Kontaktwirkung auf die Nebengesteine ausgeübt haben und in jüngerer Zeit erst durch die Erosion zutage gekommen sind.

4. Klima, Fauna und Flora. Das Klima war beträchtlichen Aenderungen unterworfen. Während der Ablagerung der älteren Schichten herrschte auch in nördlichen Gebieten, z. B. in ganz Mitteleuropa tropisches bis subtropisches Klima. Das lehren sowohl die Conchylien- und Wirbeltierfaunen mit Affen, Mastodonten, Krokodilen, großen Schild-

kröten usw., wie die Floren mit Palmen, Myrten und anderen immergrünen Gewächsen. Mit dem Fortschreiten der Tertiärzeit geht jedoch die allmähliche Erniedrigung der Temperaturen in den nördlichen Gebieten vor sich und mit dem Eintritt des Miocäns verschwinden in Mitteleuropa die Palmen. Doch sind in Grönland und Spitzbergen aus dieser Zeit noch Platanen, Magnolien und manche Laubbäume der gemäßigten Zone bekannt. Während des oberen Pliocäns sind die klimatischen Verhältnisse in Mitteleuropa ähnlich den heutigen gewesen.

Für die Pflanzenwelt im allgemeinen ist die mächtige Entwickelung der Angiospermen charakteristisch, deren erstes Auftreten in die Kreidezeit fällt. Von den Monokotylen wurde bereits erwähnt, daß Palmen (darunter Sabal, Phoenix, Chamaerops), ferner Dracaena, Smilax im Paläogen weit nach Norden in die heutige gemäßigte Zone verbreitet sind; sie ziehen sich im Neogen in die subtropische Zone zurück.

Von den dikotylen Angiospermen weisen Blätter von Lorbeergewächsen (Lauraceae) von Zimtbäumen (Cinnamomum), Epheugewächsen (Araliaceae), Myrten, gewisse Leguminosen usw. ebenfalls auf tropisches bis subtropisches Klima hin. Neben ihnen treten subtropische Laubbäume wie Ficus, Magnolia, Juglans und Platanus auf; daneben die Bäume und Sträucher unserer Wälder als Salix, Quercus, Betula, Fagus, Populus, Alnus, Acer u. a. Von letzteren kommen seit dem Miocän Arten vor, die von den lebenden nicht mehr unterschieden werden können.

Die tertiären Gymnospermen gehören fast durchgängig lebenden Gattungen und selbst noch lebenden Arten an, häufig finden sich Gingko biloba, Taxodium distichum, Sequoia, Pinus usw.

Bei den Kryptogamen scheinen unter den Farnen die Wasserfarne (Marsiliaceen und Salviniaceen) im Tertiär zuerst aufzutreten.

Der Charakter der Fauna ändert sich mit dem Eintritt des Tertiärs gegenüber dem mesozoischen Zeitalter so erheblich, daß nicht allein nach den petrographischen und Lagerungs-Verhältnissen, sondern auch nach der fossilen Tierwelt kaum eine Formationsgrenze so natürlich erscheint wie die zwischen Tertiär und Kreide.

Unter den mit Beginn des Tertiärs erlöschenden Formen sind an erster Stelle die Ammoniten und Belemniten zu nennen, die im Mesozoikum als Leitfossilien eine so überaus wichtige Rolle spielten. Ebenso waren die Saurier besonders für die Jura- und Kreidezeit charakteristisch, und wenn es auch an größeren Reptilien (Krokodilen und Schildkröten) im Tertiär keineswegs fehlt, so sind doch alle die Riesenformen der Dinosaurier, Ichthyosaurier, Pterosaurier, Mosasaurier verschwunden. Unter den Conchylien ist das Erlöschen der Inoceramen, Rudisten und Nerineen auffallend; auch das Zurücktreten in Zahl und Mannigfaltigkeit der Arten der Trigonien und der Brachiopoden muß erwähnt werden.

Dem Verschwinden einiger steht die kräftige Entwickelung anderer Tiergruppen gegenüber, die in den älteren Schichten fehlen, zurücktreten oder erst in Anfängen zu erkennen waren. Die marinen Bildungen des paläogenen Tertiärs sind durch massenhaftes Auftreten gewisser Foraminiferen, namentlich der Nummuliten ausgezeichnet, die in riesigen Gehäusen von 5 bis 6 cm, ja gelegentlich bis zu 12 cm Durchmesser gesteinsbildend in den südlichen Gebieten überall verbreitet sind. Sie charakterisieren die Ablagerungen aus wärmerem Wasser. Sie beginnen im unteren Paleocän des Mediterrangebietes und gewinnen ihre weiteste Verbreitung und Mannigfaltigkeit im Eocän, wo sie auch bis in die Meere der heutigen gemäßigten Zonen vordringen. Im Oligocän geht ihre Verbreitung wieder zurück und mit dem Eintritt des Miocäns verschwinden sie fast ganz. Ebenso in den wärmeren Meeren sind Echinoiden recht häufig, die bilateral-symmetrischen Arten überwiegen jetzt weit über die regulären. Einen außerordentlichen Reichtum an Gattungen und Arten bietet die Molluskenfauna, wobei zu berücksichtigen ist, daß es vorwiegend Flachsee-, Strand-, Brackwasser- und Süßwasserbildungen mit einstigen günstigen Lebensverhältnissen waren, die unserer Forschung zugänglich sind. Bei den Muscheln macht sich die kräftige Entwickelung der Sinupalliaten, bei den Schnecken die der Siphonostomen geltend. Da in den Tertiärablagerungen namentlich im Neogen Land- und Süßwasserschichten weithin verbreitet sind, so ist auch deren Fauna in großem Formenreichtum bekannt, wobei der naheliegende Vergleich mit den lebenden Arten besonders befruchtend auf ihre Erforschung wirkt. Bei den Gliedertieren ist die Kenntnis von Käfern, Fliegen, Spinnen und anderen Insekten aus gewissen Ablagerungen wie den zarten Kalkmergeln und plattigen Kalken von Oeningen, in hervorragendem Maße aber durch ihre vollkommene Erhaltungsweise im Bernstein bereichert worden. Unter den Krustern überwiegen im Tertiär stark die Funde von Brachyuren, obwohl auch Makruren nicht fehlen.

Von den niederen Wirbeltieren kommen Fische in manchen Schichten recht reichlich vor. Haifischzähne der Gattungen Lamna, Otodus, Carcharodon finden sich in den marinen Sanden, Mergeln und Tonen, so

z. B. im Meeressand und Rupelton oft in großer Menge; kleine Knochenfische, wie Meletta, Amphisyle, Palaeorhynchus sind für manche Schichten geradezu leitend.

Vögel kennt man schon aus der Jura- und Kreidezeit in größeren bezahnten Arten. In der Tertiärzeit findet man nicht gerade häufig Reste echter Vögel, unter denen man bereits Straußvögel, Pinguine, Schwimmvögel, Sumpfvögel, Enten, Hühner u. a. bestimmen kann.

Ganz besonderes Interesse unter den Lebewesen der Tertiärzeit beansprucht die reiche Entwickelung der Säugetiere, von deren erstem Vorkommen in mesozoischen Schichten seit der oberen Trias nur spärliche Reste Zeugnis ablegen.

Die multituberkulaten, pflanzenfressenden Marsupialier (Allotheria), die aus dem Mesozoikum übergehen, sind im untersten Tertiär Amerikas und Europas (Reims) noch verbreitet, erlöschen aber im Eocän. Dagegen sind fleisch- und insektenfressende Beuteltiere in Amerika und Australien durch das Neogen bis in die heutige Epoche zu verfolgen; im Palaeogen kamen sie selbst in der alten Welt vor. Die Hauptentwickelung nehmen die Placentalia, die schon im Paleocän mit mehreren, allerdings noch primitiven Ordnungen einsetzen. Der Formenreichtum und die Verbreitung steigern sich aber rasch derartig, daß sie schon im älteren Eocän, namentlich Nordamerikas und vielmehr noch in den späteren Stufen der Tertiärzeit allgemein maßgebend für die Gliederung aller terrestrischen Ablagerungen werden.

Im älteren Tertiär fällt in erster Linie das Emporsteigen der Huftiere (Ungulaten) in die Augen, neben ihnen das der Raubtiere; auch die Halbaffen (Prosimiae) weisen schon einen beträchtlichen Formenreichtum auf. Die älteren Huftiere, die Condylarthren, mit noch fünfzehigen, plantigraden Extremitäten sind im wesentlichen aus Nordamerika bekannt, dessen Paleocän und Eo-

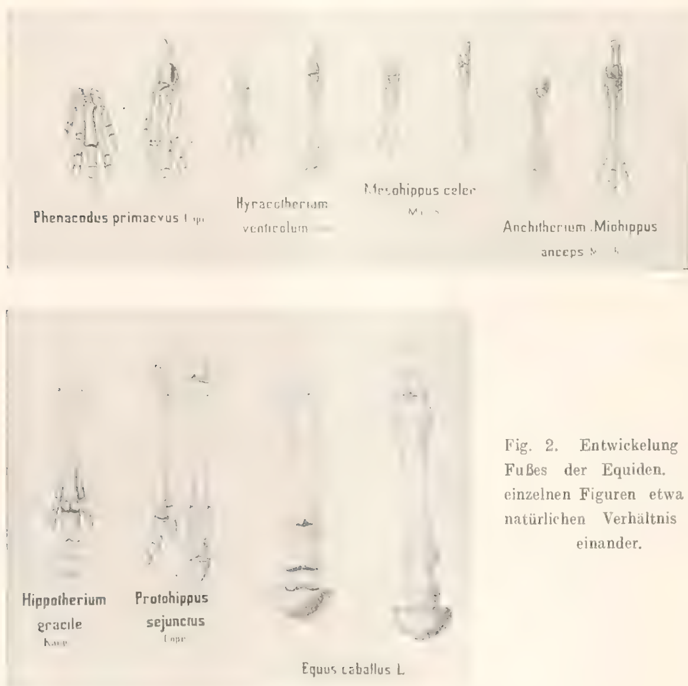


Fig. 2. Entwickelung des Fußes der Equiden. Die einzelnen Figuren etwa im natürlichen Verhältnis zueinander.

cän überhaupt für die alte Säugetierwelt die besten Aufschlüsse gegeben hat. Dann folgen in reicher Entwickelung die Perissodactylen mit den Tapiriden, Equiden und Rhinoceroten, die durch die kräftige Ausbildung der Mittelzehe ausgezeichnet sind. Das tritt besonders charakteristisch bei den Equiden hervor, wie in Figur 2 dargestellt ist; das lebende Pferd läuft nur noch auf der Spitze des Mittelfingers.

Die kräftigste Entwickelung der Artiodactylen mit den zahlreichen Wiederkäuern fällt in die jüngere Tertiärzeit und Neuzeit, für sie ist die paarige Ausbildung der dritten und vierten Zehe charakteristisch, während die übrigen rückgebildet sind.

Wegen der riesigen Formen seien noch die Amblypoden erwähnt, die mit Uintatherium und Coryphoden aus dem amerikanischen Eocän bekannt sind. Von den Sirenen kommt Halitherium u. a. häufig im Meeressand und Rupelton des Mainzer Bekkens, oft in fast vollständigen Skeletten vor.

Die Carnivoren setzen im unteren Tertiär mit den Urfleischfressern (Creodontia) ein, die mit verhältnismäßig großem, raubtierartigen Schädel ausgestattet sind. Sie lassen noch Beziehungen zu den Marsupialiern erkennen; andererseits stammen zweifellos die echten Raubtiere von ihnen ab (Miacidae), die im Gebiß durch die kräftige Entwickelung der Reißzähne ausgezeichnet sind. Die echten Raubtiere sind im älteren Tertiär noch nicht häufig; erst vom Oligocän ab beginnt ihre starke, formenreiche Ausbreitung.

Als besonders reicher Fundort für Säugetierreste mit einer Fülle verschiedener Formen, namentlich auch kleiner Arten, sind in Europa die jüngeren Paleocänablagerungen der Gegend von Reims und die oligocänen Phosphorite von Quercy berühmt. In letzteren sind auch Halbaffen (Prosimiae), die aber schon im Eocän Nordamerikas und Europas einsetzen, in größerer Zahl verbreitet. Die ersten anthropoiden Affen sind im Oligocän Aegyptens gefunden; seit dem mittleren Miocän treten sie in Europa und Südamerika, im Pliocän auch in Asien auf.

Die Wale (Cetaceen) beginnen mit einer altertümlichen Form, dem Zeuglodon im Eocän Aegyptens; sie werden erst im Miocän und Pliocän häufig und artenreich.

Insektenfresser und Fledermäuse fehlen im älteren Tertiär vom oberen Eocän ab nicht; in den Phosphoriten von Quercy sind sie schon reichlich enthalten; allein sie, wie besonders die Nagetiere, welch letztere in der heutigen Welt so außerordentlichen Formenreichtum aufzuweisen haben, kommen doch erst im Miocän und Pliocän zur Blüte.

Die eigenartigen Edentaten mit den Riesenfaultieren und Gürteltieren beginnen wohl auch schon im Eocän; doch sind ihre großen Formen erst seit dem jüngsten Tertiär zu beobachten. Das Pliocän ist im allgemeinen durch große Säugetierformen ausgezeichnet, die jedoch mit dem Ende des Tertiärs oder im Diluvium erlöschen.

5. **Die einzelnen Stufen des Tertiärs.** Die Stratigraphie der Tertiärablagerungen und der Vergleich der äquivalenten Schichten in den verschiedenen Tertiärgebieten und -becken ist noch nicht überall klar durchgeführt. Der Grund ist darin zu suchen, daß naturgemäß immer die ursprüngliche und am deutlichsten in die Augen fallende Gliederung in jedem Gebiete zuerst auf die petrographische Ausbildung begründet worden ist. Die petrographische Facies hat sich nun aber bei den marinen und brackischen Bildungen lokal in Abhängigkeit von den Strandverschiebungen und mit dem Wechsel von seichterem und tieferen Wasser, Küstennähe und Küstenferne oft in kurzen Zeitabschnitten geändert, womit in der Regel auch eine mehr oder minder auffallende Aenderung in der paläontologischen Facies verbunden sein mußte. Dadurch wird die Beurteilung der zeitlichen Zusammengehörigkeit gewisser Schichtenkomplexe erschwert. Es ist ferner zu berücksichtigen, daß für die paläontologische Horizontierung der Tertiärformation nicht Leitfossilien z. B. nach Art der Ammoniten zur Verfügung stehen, auf deren Entwickelung allein z. B. im Jura in lückenloser Folge, dank ihrer allgemeinen Verbreitung und Abänderungsfähigkeit eine fast minutiöse Zoneneinteilung durchzuführen möglich ist. Wohl wird es jetzt auch im Tertiär versucht paläontologische Zonen aufzustellen und damit zu einer strengeren und besseren Gliederung zu gelangen. Man kann das z. B. im älteren Tertiär im mediterranen Gebiet bis zu einem gewissen Grade mit Hilfe der Nummuliten. Auch auf Grund der Süßwasserfauna ist es vielleicht lokal möglich. Allein von der Aufstellung einer allgemeingültigen Zoneneinteilung dieser Art sind wir zurzeit noch weit entfernt. Nur bei gewissen terrestrischen Ablagerungen gibt die Entwickelung der Säugetierfauna Mittel an die Hand, eine schärfere Einteilung vorzunehmen und gewisse Schichtengruppen zusammenzufassen. Aber diese Stufen sind wieder nicht ohne weiteres in Einklang mit den Stufen zu bringen, die auf Grund der Conchylienfauna festgestellt worden sind. Noch schwieriger ist eine sichere Parallelisierung der Stufen, die auf Grund der Floren ausgeschieden wurden, vorzunehmen.

Bei der folgenden Besprechung der einzelnen Abteilungen der Tertiärformation können für die Entwickelung der Schichten immer nur einige Beispiele angeführt werden. Es sind dazu immer die bekanntesten europäischen Tertiärgebiete gewählt worden.

Von Fossilien sind bei Besprechung der einzelnen Stufen nur wenige genannt. Will man Tertiärfaunen charakterisieren, so ist die Aufstellung von Fossillisten unvermeidlich. Eine

derartige Behandlung würde aber über den Rahmen dieses Aufsatzes weit hinausgegangen sein.

Unter Paläogen faßt man die drei älteren Stufen des Tertiärs zusammen: Das Paleocän, das Eocän und das Oligocän.

Das Paläocän. Die Abtrennung der Stufe vom Eocän wurde 1874 von W. Schimper vorgeschlagen und 1886 durch A. v. Koenen nochmals begründet; sie ist jetzt allgemein als selbständig anerkannt. Die zu Ende der Kreidezeit und während der Tertiärzeit sich abspielenden Bodenbewegungen sind die Ursache, daß in den westeuropäischen Tertiärgebieten das Paleocän überall mit der Basis transgredierend über älteren Schichten lagert. Es ist hier eine Lücke in der Schichtenfolge vorhanden, die sich durch das Fehlen der obersten Kreideschichten oder des unteren Paleocäns kennzeichnet. Die ältesten paleocänen Ablagerungen sind brackisch, mit dem mittleren Paleocän gewinnt das Meer an Ausdehnung und breitet übergreifend marine Sande aus, stellenweise mit großem Fossilreichtum. Im Oberpaleocän treten vielfach wieder brackische und limnische Ablagerungen ein, also kommt dort wieder ein Rückzug des Meeres zum Ausdruck. In neuerer Zeit ist im östlichen Rußland, Aegypten, Tunis und Westindien auch marines unteres Paleocän bekannt geworden, das konkordant über marinen Schichten der oberen Kreide lagert, so daß ein allmählicher Uebergang vorliegt. — In Nord- und Westeuropa sind die Meere während der unteren und mittleren Paleocänzeit von nordischen Strömungen mit kälterem Wasser beeinflußt worden. Nummuliten die sich im Mediterrangebiet mit dem Beginn des Tertiärs kräftig zu entwickeln und auszubreiten beginnen, wie sonstige Arten südlicher Meere, fehlen. Erst im oberen Paleocän wird das Eintreten wärmerer, von Süden kommender Strömungen und damit die Ausbreitung der Lebewelt der gemäßigten und wärmeren Meere nach Norden erkennbar. Die Säugetierwelt ist im europäischen Paleocän ziemlich reichlich aus den Konglomeraten von Cernay bei Reims bekannt geworden, die jünger als die marinen Sande und etwa gleichaltrig mit den Puercoschichten des inneren Nordamerika sind, die eine noch viel reichere Fauna enthalten.

Die Schichtenfolge ist bisher am besten aus dem französisch-belgisch-englischen Tertiärgebiet bekannt, an das sich das dänisch-norddeutsche anschließt. Das Paleocän wird in drei Unterabteilungen gegliedert: das Oberpaleocän (Londinien), das Mittelpaleocän (Thanéthien) und das Unterpaleocän (Montien).

Als Typus für das Unterpaleocän ist der belgische Kalk von Mons angenommen; er wird bis zu 90 m mächtig und wurde früher irrtümlich als gleichaltrig mit dem mitteleocänen Grobkalk von Paris angesehen. Die Untersuchung seiner brackischen, besonders an Echiniden und Mollusken reichen Fauna hat das höhere Alter bewiesen. Er geht nach oben in Süßwasserschichten über und wird dann wieder von marinen, mittelpaleocänen Sanden überlagert. An der Basis transgrediert er teils unmittelbar über senoner Kreide, da das Danien fehlt, an anderen Stellen wird er indessen von dem ebenfalls transgredierend über Senon liegenden Kalktuff von Ciply unterlagert, der früher zur Kreide gerechnet wurde, aber wohl an die Basis des Montien zu stellen ist, da er neben abgerollten Kreidefossilien typische Korallen, Echiniden und Conchylien des Kalkes von Mons enthält. Während das Unterpaleocän in Belgien auf die Umgebung von Mons beschränkt ist, breiten sich die mittelpaleocänen marinen Sande über älteres Gebirge übergreifend weit aus. Sie gehen in oberpaleocäne Sande und Mergel mit brackischen und limnischen Fossilien über, die wieder zuoberst von marinen Sanden überlagert werden. In deren äquivalenten Schichten bei Calais und Brüssel sind auch Nummuliten beobachtet.

Im Pariser Becken bei Meudon beginnt das Unterpaleocän mit Kalken, die Cidaris Tombecki, Turritella montensis und andere Arten des Kalkes von Mons einschließen. Sie werden von weißen Mergeln mit drei Zonen von Kalkknollen, reich an marinen, brackischen, aber auch an Land- und Süßwasserconchylien überlagert. Ueber diesen Mergeln liegt Süßwasserkalk mit Physa und Paludina. Die mittelpaleocänen marinen Sande fehlen hier unter dem überlagernden Oberpaleocän. Im nördlichen Teile des Pariser Beckens zeigt das Mittelpaleocän (Thanétien) eine sehr wechselvolle Ausbildung. Es setzt im Norden mit Kalktuffen oder Sandsteinen ein, auf die weit übergreifend die typischen marinen fossilreichen Sande (sables de Bracheux) folgen. Die nächsthöheren Schichten bestehen wiederum aus Sanden (Sables de Joncherry et de Chalons sur Vesle) mit gemischter Fauna aus marinen, brackischen, limnischen und terrestrischen Arten. Ihnen entsprechen im Osten des Beckens Süßwasserschichten, die zwischen brackische Bildungen eingeschaltet sind, denen wieder südlich von Reims der etwa mit dem Konglomerat von Cernay gleichaltrige Kalk von Rilly, der nur Land- und Süßwasserformen enthält und stellenweise unmittelbar auf oberer Kreide auflagert, entspricht. Das obere Paleocän ist im Inneren des Pariser Beckens durch den plastischen Ton und die Braunkohlenbildungen des Soissonais vertreten, worauf die Sande von Cuise (Sables inférieurs) folgen, die nach Haugs Gliederung noch zum Paleocän gestellt werden (Sparnacien und Cuisien). Sie galten früher als Typus des Untereocäns im Pariser Becken. Die limnischen Bildungen des Soissonais beginnen zum Teil mit knochenführenden Konglomeraten, über denen sich Mergel mit eingeschalteten Sanden und Kohlenablagerungen vielfach übergreifend ausbreiten. Die marinen Sande von Cuise fehlen bei Paris, im Norden des Beckens kommt in ihrem mittleren Teile Nummulites elegans-planulatus vor. Zu oberst stellen sich wieder brackische Fossilien und Säugetierreste ein.

In England fehlt das Unterpaleocän. Das Tertiär beginnt im Londoner Becken mit den bis 20 m mächtig werdenden mittelpaleocänen, glaukonitischen und tonigen, marinen und fossilreichen Thanetsanden. Darüber breiten sich vielfach über die Kreide transgredierend und mit glaukonitischen Sanden mit abgerollten Feuersteinen beginnend die oberpaleocänen Ablagerungen in verschiedener Facies aus, die von West nach Ost aus Wiltshire nach Kent sich ablösend bestehen aus den limnischen sandig tonigen fossilarmen Reading-

beds, den sandig kiesigen oder tonigen Woolwich-beds mit gemischter limnischer und mariner Fauna und den marinen Sanden von Kent. Auf die Reading- und Woolwich-beds folgt durch eine Schicht mariner Sande von wechselnder Mächtigkeit getrennt der bis zu 150 m anschwellende, früher zum Untereocän gestellte London clay mit reicher Fauna von Foraminiferen, Echinodermen, Conchylien usw. und eingeschwemmten Säugetierresten, Süßwasserconchylien, Pflanzen und besonders vielen Früchten. Ueber dem London clay lagern wieder Sande, deren unterer Teil noch als Oberpaleocän angesehen wird. Die Woolwich- und Reading-beds entsprechen dem plastischen Ton des Pariser Beckens, während die genaue Parallelisierung des London clay mit seiner Fauna noch nicht ganz klar ist und wohl in den unteren Sanden von Cuise zu suchen ist. Im Becken von Hampshire fehlen Ablagerungen vom Alter der Thanetsande noch, es füllte sich erst während des Oberpaleocäns mit sandig-tonigen Schichten fluviatiler Herkunft, stand aber wohl auch mit dem Londoner Becken in Verbindung.

In Dänemark lagern transgredierend über der obersten Kreide (Craniakalk) bei Kopenhagen graue, glaukonitische Mergel mit Foraminiferen, Korallen, marinen Conchylien, Fischresten usw., die wieder von glaukonitischen Mergeln mit Foraminiferen, Spongiennadeln, Diatomeen überlagert werden. Diese Schichten gehören wohl schon zum Mittelpaleocän. Darüber sind kalkfreie Tone entwickelt, ohne Fossilien, deren genaue Stellung noch nicht sicher bestimmt werden kann. Das transgredierende Paleocän vom Alter der Schichten von Kopenhagen greift auch nach Südschweden über und ist ferner mit konglomeratischen Schichten beginnend über Norddeutschland ausgebreitet. Es ist durch Schleswig-Holstein, Nordhannover, Mecklenburg, Pommern in Bohrlöchern bis in die Gegend von Berlin sowie am Niederrhein fossilführend nachgewiesen und erstreckt sich wahrscheinlich bis weit nach Osten. Außerdem sind aus der norddeutschen Ebene Diluvialgeschiebe jungpaleocänen Alters bekannt.

In Zentralrußland sind an der mittleren Wolga paleocäne Ablagerungen studiert, die ebenfalls über oberer Kreide transgredieren, wobei die ältesten Tertiärschichten vom Alter des Montien fehlen. Nach den Fossilien lassen sie sich gut mit dem westeuropäischen Paleocän vergleichen und parallelisieren.

Auf die abweichende Entwickelung des Paleocäns, das aus den wärmeren Meeren abgelagert wurde, ist schon oben hingewiesen. (S. auch unter Eocaen.) Hier beginnt seit dem Mittelpaleocän die charakteristische Entwickelung und Ausbreitung der Nummuliten.

In Amerika ist das Paleocän durch mächtige terrestrische Bildungen vertreten. Besonders erwähnt seien die Puerco- und Torrejonschichten, aus denen eine überaus reiche Säugetierfauna bekannt geworden ist.

In neuerer Zeit ist endlich die begründete Vermutung ausgesprochen worden, daß gewisse, bisher als miocän angesehene Tertiärablagerungen des arktischen Gebietes (auf Grönland, Island, Spitzbergen usw.) nach ihrer Flora ebenfalls zum älteren Tertiär, zum Teil vielleicht zum Paleocän zu stellen sind.

Das Eocän. Das wichtigste Eocängebiet des mittleren und nördlichen Europa ist das nordfranzösisch-belgisch-englische Becken, von dem aus sich das Meer in weiten Buchten oder Armen sowohl nach Westen bis in die Bretagne wie nach Osten über Dänemark und Norddeutschland ausbreitete. Der paläontologische Charakter der Ablagerungen ist aber gegenüber dem des Paleocäns verändert. Die arktischen Arten ziehen sich zurück, es greift Fauna und Flora wärmerer Klimate Platz. Das zentrale Mittelmeer (die Thetys) gewann eine weite Ausbreitung und griff nach Norden und Süden weit hinüber über die Küstenländer des heutigen Mittelmeeres, überflutete auch Südfrankreich und trat mit dem nördlichen Becken in Verbindung, die sich in den aufeinander folgenden Zeitabschnitten in Abhängigkeit von den Hebungen und Senkungen des Meeresgrundes weiter oder enger gestaltete, zeitweise auch unterbrochen sein konnte. Die hohen Faltengebirge begannen mit ihren zentralen Teilen als Inseln über den Meeresspiegel emporzusteigen.

Der Umfang der Eocänstufe ist hier nach der Haugschen Umgrenzung angenommen, wobei der London clay und die Sande von Cuise mit ihren Aequivalenten noch ins obere Paleocän gestellt sind. Das ist, wenn man berücksichtigt, daß die Gliederung im Pariser Becken und auch anderwärts doch mehr nach stratigraphisch-petrographischen als nach rein paläontologischen Gesichtspunkten durchgeführt ist, nicht unberechtigt, weil die charakteristische Aenderung in der Zusammensetzung der Fauna im Pariser Becken sich erst nach dem Abschluß der Sande und mit dem Eintritt der Kalkfacies des Grobkalkes vollzieht, wenn auch einzelne Nummuliten schon vorher erscheinen. Andererseits ist zuoberst das Ludien zum Eocän gezogen, so daß das Unteroligocän erst mit den Lattorfer Schichten und ihren gleichaltrigen Ablagerungen beginnt.

Man gliedert dann das Eocän am besten nur in zwei Unterstufen: Obereocän und Untereocän.

Im Pariser Becken beginnt das untere Eocän (Lutétien und Auversien) mit dem Pariser Grobkalk, einer kalkig-mergeligen Schichtenfolge, die bis zu 45 m Mächtigkeit erreicht. Mit dem Eintritt der marinen Kalkfacies breitete sich die reiche Fauna der wärmeren südlichen Meere auch im Paris-Londoner Becken aus, so daß unter den Fossilien gegenüber dem Paleocän mit vorherrschender Lebewelt der gemäßigten und kälteren Meere ein auffallender Wechsel zum Ausdruck kommt. Der Grobkalk gibt der weiten Umgebung von Paris das orographische Gepräge. Er ist die Ursache für die Entstehung der vielfach noch mit jüngeren Ablagerungen bedeckten Plateauberge, welche mit steilen Hängen nach den tiefeingeschnittenen Flußtälern herabstürzen. Man gliedert ihn in drei Stufen, von diesen sind die beiden unteren marin, während die obere brackisch ist. Die untersten Schichten lagern transgredierend über den Sanden von Cuise, deren oberste Lagen vorher mehr oder minder erodiert wurden; die Bodenbewegungen dauern an, denn auch innerhalb der einzelnen Stufen des Grobkalkes erkennt man an den Rändern Vorgreifen und Rück-

zug des Meeres, also lokales Fehlen oder Uebergreifen einzelner Glieder.

Der untere Grobkalk beginnt mit nur stellenweise entwickelten glaukonitischen Sanden noch ohne Nummuliten, über denen grobkörniger Glaukonitsand mit Kieselgeröllen und ganz aus Nummulites laevigatus bestehenden Kalkknollen liegt. Die Schichten führen in Menge Nummulites laevigatus Lamarcki, Korallen, Bryozoen, Muscheln und Fischzähne. Dann stellen sich geschlossene, mehr oder minder glaukonitführende Kalkbänke, ebenfalls mit reicher Fauna von Muscheln und Schnecken usw., ein.

Der mittlere Grobkalk besteht aus glaukonitischen, bauwürdigen Kalksteinen mit großen Gastropoden-Steinkernen (Cerithium [Campanile] giganteum), Foraminiferen, Seeigeln, Conchylien usw., über denen als oberes Glied der Milioliden-kalk lagert, reich an Foraminiferen, etwas weniger reich an anderen Fossilien. Er zerfällt mancherorts in lockeren Kalksand, in dem die Versteinerungen wohlerhaltene Schalen besitzen.

Transgredierten schon die mittleren Schichten namentlich gen Westen an manchen Stellen unmittelbar über die Braunkohlentone des Soissonais, so tritt das Uebergreifen des oberen Grobkalkes noch viel stärker in Erscheinung. Das Meer verflacht sich, es entstehen Buchten, Flüsse führen ihr Material zu, und so wechseln marine, brackische und eingeschwemmte Süßwasserfaunen, welch letztere an den Rändern des Beckens auch schon in den tieferen Schichten nicht fehlten. In abgeschlossenen Buchten kam Gips zum Absatz. In den unteren Schichten lagert zwischen Cerithien führenden Kalken die „banc vert" eine grüne Mergelschicht mit Nagetier- und Pflanzenresten. Die obersten Ablagerungen werden durch die caillasses gebildet, dünne Kalkbänke mit zwischengelagerten Mergeln, nicht sehr reich an Versteinerungen (Cerithien).

Nach Abschluß der Bildungen des Grobkalkes folgte eine beträchtliche Senkung des Untergrundes und Ueberflutung durch das Meer, aus dem die Sande von Beauchamp (Sables moyens) zum Absatz kamen. Sie enthalten eine beschränkte Anzahl neuer Formen, darunter Nummulites variolarius, aber im wesentlichen setzt die reiche Fauna des Grobkalkes in sie fort mit großen Cerithien und anderen großen Schnecken und Muscheln der mittleren Abteilung. Die Mächtigkeit der Sande, die teilweise zu Sandsteinen verkittet sind, schwankt zwischen 4 und 50 m; man unterscheidet eine Anzahl Horizonte, die aber nicht den Wert paläontologischer Zonen haben. In der oberen Abteilung stellt sich wieder ein Wechsel zwischen marinen Schichten und solchen, die auch Brackwasser- und Süßwasserformen enthalten, ein.

Das Obereocän wird in der unteren Abteilung (Bartonien) durch Süßwasserkalke charakterisiert, die mit marinen und brackischen Sanden wechseln, wobei die Kalke unten, die Sande oben vorherrschen. Der untere Kalk von Saint Ouen, mancherorts (Oise) durch brackische Sande in eine obere und untere Abteilung getrennt, ist ein weißer Kalk, der mit Gips- und dolomithaltigen Mergeln wechsellagert. Darüber folgen die Sande von Cresnes, die in ihrer Facies den Sanden von Beauchamp ähnlich sind. Die obere Abteilung wird durch die Mergel mit Pholadomya ludensis (Ludien), die auch Gipseinlagerungen enthalten, gebildet. Sie transgredieren wiederum, und sind im wesentlichen marin, wenn sie auch eingeschwemmte Land- und Süßwasserconchylien führen. Von Haug u. a. wird zum obersten Eocän auch die ganze Stufe des Gipses von Montmartre gezogen, der von anderen Autoren teilweise zum Oligocän gestellt wird. Vgl. unter „Oligocän".

In Belgien ist das Untereocän durch zwei Stufen vertreten. Das Bruxellien besteht aus etwa 50 m mächtigen Sanden mit Nummulites laevigatus, die auch noch eine Anzahl von Fossilien der Sande von Cuise führen. Das Laëkien beginnt an der Basis mit Kiesen und über diesen breiten sich Kalksande aus, in denen besonders Nummuliten, aber auch andere marine Fossilien vorkommen. Das Aequivalent der Sande von Beauchamp (Ledien) bilden reduzierte, aber verschiedentlich transgredierende Kalksande, in denen u. a. Nummulites variolarius verbreitet ist. Im Obereocän entsprechen die fossilreichen Sande des Wemmelien dem englischen Barton clay; sie enthalten auch die Arten der allerobersten Eocänschichten, zu denen vermutlich noch die marinen Sande von Assche gehören.

Für das Untereocän Englands galt in den bisherigen Gliederungen der London clay als Typus, er ist hier mit Haug zum Oberpaleocän gestellt. Im Becken von Hampshire sind untereocäne, etwa 30 m mächtige, mit konglomeratischen Schichten beginnende marine Sande und glaukonitische Tone entwickelt. Ihr unterer Teil enthält Nummulites laevigatus und Cerithium giganteum usw. und entspricht dem Pariser Grobkalk, der obere den Sanden von Beauchamp mit Nummulites variolarius. Darüber lagert der 100 m mächtige, obereocäne Barton clay, eine marine Bildung tieferen Wassers mit reicher Fauna; es ist ein grauer, bräunlicher oder grünlicher Ton mit sandigen Zwischenlagen und enthält Nummuliten (Prestwichi) in den untersten Schichten. Ueber ihm lagern besonders auf der Insel Wight verbreitete, weiße Sande mit brackischer Fauna. Darüber folgen Süßwasserschichten, die Lower Headon beds, Tone, sandige Tone und Süßwasserkalke mit Conchylien und Pflanzen, darunter Palmen und andere Gewächse der wärmeren Klimate. Sie sind nach J. Boussac noch zum Obereocän zu stellen, während die mittleren und oberen Headon beds dem Oligocän angehören.

Im Londoner Becken wird das Eocän durch die mittleren und oberen marinen Bagshotsande repräsentiert. Ihre unterste Stufe ist mit dem London clay dem Paleocän angegliedert. Die mittleren Sande entsprechen dem Grobkalk, während die oberen Schichten vermutlich den Sanden von Beauchamp und dem Barton clay gleichzustellen sind. Dem Ludien äquivalente Ablagerungen fehlen.

In Norddeutschland ist marines Eocän nur in Bohrlöchern aufgefunden worden. Man vermutet indessen, daß aus eocänen Schichten die überall — auch in der unteroligocänen blauen Erde des Samlandes — auf sekundärer Lagerstätte vorkommenden Bernsteinmassen stammen. Sonst kommt mit Ausnahme des Alpengebietes marines Eocän in Deutschland nicht vor. Wohl aber findet man in Süddeutschland isolierte Süßwasserablagerungen von eocänem Alter.

Dazu gehört ein Teil der Bohnerzbildungen, die im Elsaß, der Schweiz, Württemberg und Bayern verbreitet sind und in denen sich gelegentlich Säugetierreste finden, die das eocäne Alter erkennen lassen. Besonderes Interesse beansprucht die Ablagerung bituminöser Schiefertone bei Messel am Odenwaldrande bei Darmstadt, die früher zum Miocän gestellt wurden. Sie enthalten eine Fauna von Fischen, Schildkröten, Krokodilen, Vögeln, aber auch Säugetieren, wie Propalaeotherium, Cryptopithecus und Pflanzen, deren eocänes Alter nach neueren Untersuchungen wahrscheinlich gemacht ist. Als Obereocän werden ferner die Süßwasserkalke von Buchsweiler angesehen.

Wie schon oben erwähnt worden ist, erhielt das zentrale Mittelmeer (die Thetys) zur Eocänzeit seine weiteste Ausdehnung. Es schob seine Küsten weit nach Norden bis in das Voralpengebiet Südbayerns vor und ebenso drang es weit in den afrikanischen Kontinent ein, überflutete weite Gebiete Südfrankreichs wohl bis zum atlantischen Meer und stand nach Osten mit dem indischen Ozean in Verbindung. Seine Ablagerungen unterscheiden sich petrographisch von denen des französisch-englischen Beckens dadurch, daß viel mehr harte Gesteine gegenüber den lockeren Sedimenten herrschen: also namentlich Kalksteine und neben diesen bindemittelreiche Sandsteine, aber auch Schiefertone und Schiefer, die ihre Struktur dem Gebirgsdruck verdanken. Paläontologisch sind die kalkigen, meist wohl in etwas größerer Küstenferne, wenn auch in der Flachsee abgesetzten Bildungen in erster Linie durch massenhaftes, gesteinsbildendes Auftreten der Nummuliten gekennzeichnet, sie sind also ausgesprochen marin, trotzdem fehlen auch in ihrem Gebiet in der Nähe der einstigen Küsten, in Buchten und am Gestade von Inseln, mehr oder minder mächtige brackische und selbst limnische Ablagerungen nicht. Man hat versucht, nach der Verbreitung der Nummuliten Zonen im älteren Tertiär aufzustellen. Eine Tabelle ist hier nach H. Douvillé, J. Boussac und E. Haug wiedergegeben.

			Radiatae	Reticulatae	Assilina
Oligocän		mittleres unteres	N. Bouillei-Tournoueri N. vascus-Boucheri	N. intermedius-Fichteli	
Eocän	oberes	oberes	N. Bouillei-Tournoueri	N. Fabianii	
		unteres	N. Bouillei-Tournoueri N. contortus-striatus		
	unteres	oberes	N. contortus-striatus N. Heberti-variolarius	N. Brongniarti N. aturicus Rouaulti N. Brongniarti, N. laevigatus	A. exponens A. granulosa
			N. atacicus-Guettardi N. irregularis	N. aturicus Rouaulti N. complanatus, gizehensis	A. exponens
		unteres	N. atacicus N. irregularis	N. laevigatus-Lamarki	A. spira
Paleocän		oberes	N. elegans-planulatus		
		mittleres	N. spileccensis-bolcensis		
		unteres	—		

Die nummulitenreiche, vorwiegend kalkige Facies herrscht indessen im Mediterrangebiet nicht allein, neben ihr tritt in engster Verbindung eine andere, die erstere stellenweise über- und unterlagernd auf, die aus einförmigen, oft nur Fucoiden führenden, sonst fossilleeren Sandsteinen und Schiefern besteht. Es ist der Flysch oder Macigno, der aus den Alpen in den Appenin und durch die Karpathen und Balkangebirge nach Kleinasien und den Kaukasus in einer breiten Zone weit nach Osten zu verfolgen ist. Diese Flyschfacies beginnt schon in der Kreide und setzt sich durch das untere Tertiär bis in das Oligocän fort. Im nordalpinen Gebiet kommen darin große Mengen fremder Gesteine vor, die nach Gümbels Annahme von einem, den heutigen Alpen vorgelagerten, mit dem Namen „Vindelicisches Gebirge" bezeichneten Gebirgszuge herrühren sollten, jetzt aber als Reste von aus Süden stammenden Ueberschiebungsdecken angesehen werden.

Eocäne Nummulitengesteine sind z. B. bekannt in der Schweiz aus Appenzell und aus den Gebieten des Thuner und Vierwaldstätter Sees z. B. in den Klippen bei Einsiedeln und an der Axenstraße. Bei Nizza steht Eocän an, in dem man die Schichtenfolge aus den unteren Lagen mit den Fossilien des Pariser Grobkalkes bis ins Obereocän mit Nummulites variolarius verfolgen kann. In den bayrischen Alpen kennt man nur

isolierte Schollen. Am Untersberg bei Reichenhall lagert über oberer Kreide Kalk mit Lithothamnium u. a. und Nummulites Fabianii. Darüber lagern graue Mergel mit sandigen Kalksteinbänken mit Nummulites contortus striatus, Fabianii und oben Kalksandsteine mit den gleichen Nummuliten. Am Rande der Flyschzone stehen am Kressenberg bei Traunstein zuunterst über oberer Kreide sandige Mergel mit Glaukonit, darüber folgen glaukonitische Kalke mit Nummuliten, Sandsteine, dann grobkörnige Sandsteine mit einem Lager bauwüdigen oolithischen Eisensteins, in dem neben Nummulites laevigatus u. a. Cerithium giganteum und viele andere Arten des Pariser Grobkalkes verbreitet sind.

In Norditalien ist das Tertiär des Vicentinischen Gebietes ausgezeichnet studiert. Es lagert transgredierend über der Scaglia der oberen Kreide und beginnt unten 1. mit den oberpaleocänen basaltischen Tuffen von Spilecco, aus deren Auftreten das Vorhandensein vulkanischer Eruptionen schon in der ältesten Tertiärzeit erhellt; sie gehen allmählich in die Kalke von Spilecco über. Diese Schichten führen u. a. Nummulites spileccensis-bolcensis. Es folgt das Untereocän, dessen unterstes Glied 2. die Kalke von Monte Bolca bilden mit Nummulites atacicus, laevigatus u. a., eine Folge verschiedenartiger Kalkbänke, die in auch sonst reicher Fauna zahlreiche wohlerhaltene Meeresfische und auch Palmen und andere Pflanzenreste bergen. Zuoberst schalten sich Bänke mit Brackwasserfossilien ein. 3. Die nächste Stufe bilden die Schichten von San Giovanni Ilarione, Kalkbänke mit vulkanischen Tuffen wechsellagernd, in denen eine reiche Menge wohlerhaltener Fossilien steckt, von Nummuliten finden sich Nummulites atacicus, Assilina spira u. a. 4. Die Roncaschichten. Die Beziehungen dieser Schichten zu den schon genannten und das genaue Alter sind bei Ronca nicht sicher bestimmbar, weil sie dort zwischen basaltischen Gesteinen lagern. Es sind zwei durch vulkanische Tuffe getrennte Kalkhorizonte, deren reiche Fauna Nummulites aturicus, Brongniarti und variolarius enthält, unter brackischem Einschlag nahe Beziehungen zum Pariser Grobkalk besitzt, aber auch Arten führt, die diesem fehlen. Vielleicht sind die Roncaschichten den Sanden von Beauchamp im Alter gleichzustellen, von manchen sind sie aber auch unter die Schichten von San Giovanni Ilarione eingereiht worden. Das Obereocän im Vicentinischen Gebiet bilden 5. die Priabonaschichten, Kalke, mergelige Kalke und Mergel, in denen keine vulkanischen Tuffe vorkommen. Ihre reiche Fauna mit Nummulites Fabianii enthält vorwiegend obereocäne, aber auch eine beträchtliche Beimischung oligocäner Arten.

Große Verbreitung besitzen die Nummuliten führenden Eocänablagerungen in Nordafrika. Am besten bekannt sind sie aus Aegypten, wo ja Nummulitenkalke das Material zum Bau der Pyramiden geliefert haben. Die Schichten liegen dort noch fast horizontal und schließen eine reiche Fauna ein. Sie folgen an manchen Stellen konkordant über mariner oberer Kreide, so daß keine scharfe Grenze zu bestimmen ist, an anderen Stellen transgredieren sie auch. Zittels Lybische Stufe umfaßt das ganze Paleocän. Sie besteht unten aus Kalken, die mit Mergeln wechsellagern und etwa 200 m mächtig werden. In der an Foraminiferen reichen, aber auch Korallen, Seeigel, Muscheln u. a. führenden Fauna erscheinen die ersten Nummuliten. Oben liegen kieselige Kalke, in denen eine Anzahl Nummuliten verbreitet sind, die im Pariser Becken erst im Untereocän auftreten. Das Untereocän in der lybischen Wüste bildet die Makattamstufe, bestehend ebenfalls aus Kalken und Mergeln, zwischen die sich in der oberen Abteilung auch Sandsteine einschalten. Die Gesteine sind überreich an Foraminiferen, unter denen Nummulites gizehensis besonders charakteristisch ist und in großen Gehäusen von 5 bis 6 cm Durchmesser gelegentlich auch doppelt so groß verbreitet ist. Im Obereocän finden sich Lithothamnienkalke mit Nummulites Fabianii, nach Blanckenhorn aber auch Brack- und Süßwasserkalke.

In Nordamerika trifft man an den Rändern des Kontinents marine Eocänbildungen, zwischen denen ebenfalls brackische und limnische Schichten erscheinen. Im Innern der Vereinigten Staaten sind dagegen mächtige Süßwasserablagerungen mit reicher Säugetierfauna entwickelt. Sie werden nach diesen von unten nach oben in Wasatch-, Bridger- und Uinta-Schichten gegliedert. Im Norden, so im mittleren Kanada ist das Eocän in den Fort-Union-Schichten entwickelt, die eine reiche Flora der gemäßigten Klimate beherbergen, die auch weiter nördlich bis nach Grönland vorkommt.

Das Oligocän. Mit dem Beginn der Oligocänzeit tritt in Europa eine wesentliche Veränderung in der Verteilung von Wasser und Land ein. In Deutschland dringt das Meer weit nach Mitteldeutschland, im Osten bis in die Gegend von Leipzig-Aschersleben und nach Westen um den Harz herum bis in die Gegend von Kassel vor und reicht in einem Arm oder einer Bucht, die sich durch die heutige Rheintalsenke zog, bis weit nach Süden an den Rand des heutigen Juragebirges, wo es jedenfalls mit dem alpinen Flyschmeere und später dem Molassemeere in Verbindung stand. Im Osten waren weite Gebiete von Rußland und Innerasien überflutet. Dagegen wich das Meer in Frankreich und England zurück. Kräftige Bodenbewegungen spielten sich während der ganzen Oligocänzeit ab. Die durch die heutigen Faltengebirge schon im Eocänmeer erzeugten Inseln gewinnen an Ausdehnung und durch sich wiederholende Hebungen und Senkungen des Meeresbodens und Strandverschiebungen an den Kontinenten entsteht häufiger, manchmal auch schroffer Wechsel in der petrographischen und paläontologischen Facies. Mit dem Oberoligocän tritt der allmähliche allgemeine Rückzug der Meere von den heutigen Landmassen deutlich in Erscheinung. Das Klima war in Nordeuropa noch ziemlich warm. Pflanzen des Mediterrangebietes mit Palmen sind noch im Oberoligocän bis nach Mitteldeutschland (Münzenberg) verbreitet, während sich andererseits in Norddeutschland in den Meeren schon wieder nordischer Einfluß durch das Zurückweichen der Fauna der wärmeren Meere geltend macht. In den limnischen Bildungen kam es zur Entstehung mächtiger Braunkohlenlager.

Deutschland. Die Oligocänstufe ist in Norddeutschland im wesentlichen marin entwickelt und läßt eine deutliche Dreigliederung erkennen. Allerdings trifft man die drei Abteilungen nur an wenigen Stellen übereinanderliegend an, so am Doberg bei Bünde in Westfalen und in der Mark Brandenburg, wo die lückenlose Folge mariner Schichten in einer Anzahl von Bohrlöchern festgestellt worden ist. Das Oligocän lagert in Norddeutschland teils über älterem Gebirge (Trias, Kreide), teils über Eocän oder Paleocän. In der Provinz Sachsen liegen unteroligocäne, am Harzrande noch etwas ältere Braunkohlenbildungen unter marinem Tertiär.

Das Unteroligocän Norddeutschlands ist vorwiegend sandig entwickelt. Aufschlüsse sind selten und immer nur auf kleine Gebiete beschränkt. Zweifellos ist vor der Ablagerung des Diluviums das ältere Tertiär an vielen Stellen erodiert worden. In einem alten Aufschlusse bei Westeregeln lagerten über Braunkohle fossilreiche glaukonitische Sande. Am bekanntesten durch die reiche Fauna mit Ostrea ventilabrum u. a. sind die Aufschlüsse von Lattorf und ferner von Egeln, Helmstedt, Aschersleben und Umgebung, wo nach v. Koenen über bis zu 36 m mächtiger Braunkohle, die auf Buntsandstein und Keuper lagert, marine unter- und mitteloligocäne Sande folgen. Die unteren Sande waren grünlich-grau, feinkörnig, etwas glaukonitführend, enthielten eine 15 cm starke Schicht mit Schiefertonbrocken und kleinen Milchquarzgeröllen und waren stellenweise zu harten Kalksandsteinknollen verkittet. Am Doberg und an der Brandhorst bei Bünde liegen die unteroligocänen Fossilien in blaugrauen sandigen Mergeln. Im Samlande in Ostpreußen stehen fossilreiche, phosphorithaltige, glaukonitische Sande an, an deren Basis die 1,5 m mächtige Blaue Erde mit eingerollten Bernsteinstücken lagert. Auch in Schleswig-Holstein ist Unteroligocän nachgewiesen.

Für das Mitteloligocän ist der mitunter bis zu über 170 m Mächtigkeit anschwellende Rupel- oder Septarienton charakteristisch. Das ist ein blaugrauer Mergel, in dem wie in anderen Mergeln auch Septarien vorkommen können. Er ist an vielen Stellen außerordentlich reich an Foraminiferen (auch noch ein kleiner Nummulit, Nummulites germanicus), schließt aber gelegentlich, vielleicht namentlich da, wo er sandig wird, auch eine reichere mitteloligocäne Conchylienfauna ein, unter der Leda Deshayesi und Nucula Chasteli für ihn besonders charakteristisch sind. An manchen Stellen, so bei Stettin, treten in ihm fossilreiche, feinkörnige Sande auf, die an anderen Orten, wohl näher den Küsten des Meeres, auch die ganze Stufe vertreten können, so bei Leipzig, Magdeburg, Buckau, Söllingen u. a. In der Provinz Sachsen, bei Halle u. a. lagert der Rupelton mit Sanden an der Basis über der unteroligocänen Braunkohlenbildung. Am Niederrhein bei Erkelenz, Holländisch-Limburg usw. ist das Mitteloligocän mit Foraminiferen, sonst aber nicht reich an Fossilien in zusammenhängender Decke über älterem Gebirge bis zu 136 m Mächtigkeit entwickelt. Auch bei Ratingen und Mülheim a. d. Ruhr ist es unter dem Diluvium nachgewiesen.

Das Oberoligocän ist in der norddeutschen Ebene in Bohrlöchern über älterem Tertiärgebirge, aber auch über älteres Gebirge transgredierend aufgefunden. Es besteht aus feinkörnigen, teils fossilführenden, teils aber auch fossilarmen, glimmerreichen, glaukonitischen Quarzsanden von 40 m und mehr Mächtigkeit. Als Typus für das Oberoligocän sind indessen die versteinerungsreichen, besonders Muscheln und Schnecken führenden, mehr oder minder mergeligen Sande aus der Umgebung von Kassel beschrieben worden. Mit ihnen gleichalterig sind die oberen Sande vom Doberg bei Bünde, die sich besonders durch das Vorkommen großer, wohlerhaltener Stücke der Terebratula grandis und von Seeigeln auszeichnen. Fossilführende oberoligocäne Schichten sind ferner am Niederrhein bis in die Gegend von Aachen verbreitet, ihre Fauna ist aus Sanden bei Düsseldorf, Krefeld, Neuß usw. beschrieben. In Mecklenburg ist als Oberoligocän das Sternberger Gestein bei Parchim bestimmt worden, das in sandig-eisenschüssigen Konkretionen auch als Diluvialgeschiebe verbreitet und reich an Conchylien ist (Sternberger Kuchen).

Die norddeutschen Braunkohlenablagerungen sind zum Teil bereits erwähnt worden. Diejenigen des thüringisch-sächsischen Gebietes mit reicher Flora und Lagern von bitumenreichen, zur Paraffinfabrikation geeigneten Kohlen und mit bräunlicher bis gelber Wachskohle (Pyropissit) gehören dem Unteroligocän an. Die Kohlen am Harzrande, die von marinem Unteroligocän überlagert werden, sind etwas älter, vielleicht schon eocän. In der Leipziger Gegend sind die unteren Flöze oligocän, während dort die jüngere Braunkohlenbildung schon ins Miocän zu stellen ist. Ins Ober- oder Mitteloligocän gehört ferner der untere Teil der böhmischen Braunkohlenlager. Die auf den thüringischen Plateaus verbreiteten Knollensteine, aus harten, nicht selten pflanzenführenden Quarziten bestehend, sind vermutlich Reste aus unteroligocänen Braunkohlensanden.

Während in Norddeutschland die marinen Oligocänschichten nur an verhältnismäßig wenigen Stellen über Tage anstehen, finden sich großartige Aufschlüsse im Mainzer Becken. Als Mainzer Becken im engeren Sinne bezeichnet man die Tertiärbildungen in der weiteren Umgebung von Mainz, d. h. in der Provinz Rheinhessen und anstoßendem Gebiet und im Taunusvorland. Im weiteren Sinne werden dazu aber auch die Ablagerungen der Wetterau bis in die Gegend von Gießen und am Südrande des Vogelsberges und diejenigen der Rheinsenke nach Süden bis an die Reichsgrenze gezogen. In diesem weiten Becken herrschen marine Ablagerungen nicht in dem Maße vor wie in Norddeutschland. Im Mainzer Becken im engeren Sinne sind nur Mittel- und Oberoligocän und Untermiocän entwickelt. Nach der petrographischen Ausbildung gliedern sich die Schichten wie folgt. Von unten nach oben: 1. Sandige Etage: der Meeressand, Sande und Kiese, stellenweise zu harten Kalksandsteinen verkittet, mit reicher typisch mitteloligocäner Fauna. Er lagert im engeren Mainzer Becken transgredierend über Rotliegendem oder auch Devon.

Die besten Aufschlüsse liegen an den Rändern des Beckens bei Alzey, Waldböckelheim, Mandel usw. Mächtigkeit bis zu 40 m. 2. Mergelige Etage: bestehend aus a) dem Rupelton, b) dem Cyrenenmergel. Der Rupelton ist ein rein mariner, stellenweise mit sandigen Tonen, auch Sanden und Kiesen transgredierender, petrographisch sehr gleichmäßig entwickelter, blaugrauer zäher Mergel, in dem in manchen Lagen Septarien vorkommen. Er wird bis 120 m mächtig und ist reich an Foraminiferen. Andere Fossilien neben Leda Deshayesi und Nucula Chasteli fehlen nicht, sind aber selten. Nur Fische trifft man hauptsächlich in zwei Horizonten, die durch 10 bis 15 m Mergel getrennt sind, reichlich an, oben Meletta Heckeli, unten Amphisyle Heinrichi. Wo Rupelton über Meeressand lagert, sind immer nur wenige Meter von ersterem entwickelt. Der Uebergang vollzieht sich innerhalb einiger Dezimeter, wobei es den Anschein hat, daß stellenweise Sand aufgearbeitet sei. Im Cyrenenmergel, der ebenfalls bis zu 120 m mächtig werden kann, wechseln marine, brackische und limnische Schichten. An der Basis liegen marine, oft mergelige Sande, im wesentlichen mit der Fauna des Meeressandes. In der mittleren Abteilung treten zwischen brackischen Mergeln mit Cyrena semistriata dünne Braunkohlenflöze mit Süßwasserfauna auf, dann kehrt in den oberen Mergeln stellenweise Sand mit brackischen und marinen Fossilien wieder, unter denen auch einige oberoligocäne Arten vorkommen. Die obersten Mergel enthalten, wo sie nicht erodiert sind, wieder Süßwasserfossilien. 3. Die kalkige Etage mit a) dem Cerithienkalk, b) den Corbiculaschichten, c) den Hydrobienschichten. Der Cerithienkalk beginnt an den Rändern des Beckens transgredierend mit sandigen, Foraminiferen und einige andere marine Arten führenden Schichten, an anderen Stellen mit festen Kalken oder Mergeln. Seine oberen Schichten, Kalke und Mergel, sind reich an brackischen Arten und eingeschwemmten Land- und Süßwasserconchylien, darunter Helix Ramondi als typisch oberoligocäne Art. Darüber folgen mit allmählichem Uebergang die Corbiculaschichten, die man mit dem Auftreten der Hydrobia inflata beginnt und mit ihrem Verschwinden abschließt. Das Wasser hatte zu Anfang dieser Stufe noch stärkeren Salzgehalt, der sich weiterhin mehr und mehr verringerte. In der Mitte lagern feste Kalkbänke, reich an Corbicula Faujasi. Eingeschwemmte Land- und Süßwasserconchylien sind häufig. Im Osten des Beckens ist die Entwickelung stärker mergelig und brackisch. Die Cerithien und Corbiculen verschwinden oben und es folgen die kalkig mergeligen Hydrobienschichten, für deren untere, aus plattigen Kalken und Mergeln bestehende Abteilung Melanopsis Fritzei leitend ist, die in den oberen Schichten fehlt. Hydrobia ventrosa tritt gesteinsbildend auf. Die oberen Kalke und Mergel enthalten eine Unmenge von Landschnecken.

Im Osten des Beckens zwischen Hanau und Frankfurt folgen dann noch jüngere Schichten, die beim Miocän im Zusammenhang mit Corbicula- und Hydrobienschichten erwähnt sind.

Meeressand und Rupelton entsprechen zweifellos dem Mitteloligocän Norddeutschlands mit der Fauna von Söllingen, Magdeburg, Stettin usw. Der Meeressand kennzeichnet die Transgression des mitteloligocänen Meeres im Mainzer Becken. Nach seiner Ablagerung wich das Meer namentlich im Südosten und Osten wieder etwas zurück, währenddessen sich im Tiefsten des Beckens Rupelton ablagerte, der später in seiner mittleren und oberen Abteilung wieder über Meeressand und auch älteres Gebirge (Offenbach und andere Orte) übergriff. Die unteren Sande des Cyrenenmergels (Schleichsande) müssen ihrer Fauna nach noch ins Mitteloligocän gestellt werden. Erst in den oberen Sanden und Mergeln über dem Braunkohlenhorizont kommen oberoligocäne Arten, wie sie in den Sanden von Kassel verbreitet sind, vor. Das Oberoligocän stellt im übrigen der Cerithienkalk dar. Im Norden sind am Rande des Vogelsberges und in der Wetterau die beiden mergeligen Mitteloligocänstufen bis in die Gegend von Lich sicher nachgewiesen. Der Cerithienkalk nimmt nach Norden mehr und mehr sandigen Charakter an und bei Münzenberg besteht er aus sehr festen Sandsteinen mit reicher Flora, die noch Palmen enthält. Darüber lagern ebenfalls sandige Corbiculaschichten, weiterhin Hydrobienkalke. Im Nordwesten des Mainzer Beckens und am Rhein sind im Oberoligocän fluviatile Ablagerungen verbreitet, die von Mordziol als Vallendarer Stufe beschrieben worden sind. Diese sandigkiesige Entwickelung entspricht aber nicht nur den Cerithiensanden des Mainzer Beckens sondern umfaßt auch noch die Corbicula- und vielleicht noch höhere Schichten, also nur der untere Teil ist als gleichalterig mit dem Cerithienkalk zum Oberoligocän zu stellen.

Besonderes Interesse erregt die Entwickelung des Oligocäns in und am Rande der rheinischen Tiefebene, wo im südlichen Elsaß nördlich von Mühlhausen und auch über dem Rhein in Baden durch Tiefbohrungen die tertiäre Salzformation mit Kalisalzen aufgeschlossen wurde. Nach B. Förster, L. van Werveke, W. Wagner gliedert sich dort die Tertiärformation von oben nach unten in 1. Süßwasserzone (bunte Mergel mit Kalksteinen) mit Helix, Planorbis usw. bis 80 m mächtig. 2. Cyrenenmergel, etwa bis 60 m mächtig, oben brackisch mit Cyrena semistriata und Cerithien, zu unterst mit mergelig-sandig-glimmerigen Schichten, die die typische Fauna der unteren Schleichsande im Cyrenenmergel des Mainzer Beckens enthalten. Dann folgen 3. etwa 200 m Melettaschiefer und 4. 20 m Amphisyleschiefer, die von 5. 8 m Foraminiferenschiefer unterlagert werden. Dann kommt die Salzformation, 6. bunte Mergel mit Steinsalz 420 m. 7. Streifige Mergel mit Steinsalz und in der obersten Zone mit Kalisalz 520 m mächtig und 8. endlich über 159 m mächtige grüne Mergel. Das ganze Oligocän besitzt hier also eine Mächtigkeit von etwa 1450 m. Es lagert über oberem Dogger, an anderen Stellen ist auch Malm in der Unterlage angetroffen worden. Die Salzformation wird in das Unteroligocän gestellt, sie besteht aus dünnen Lagen von Salz, die mit dünnen Mergelschichten wechseln. Die Meletta- und Amphisyleschiefer sind gleichalterig mit dem Rupelton, also Mitteloligocän, und ebenso ist der Cyrenenmergel, der mit dem des Mainzer Beckens übereinstimmt, an die obere

Grenze des Mitteloligocäns zu stellen. Die Süßwasserschichten der Kalksteinzone müssen dann ganz oder doch teilweise als gleichalterig mit dem Cerithienkalk angesehen werden und sind demnach ins Oberoligocän einzureihen.

Unteroligocän ist ferner im Unterelsaß aus der Gegend zwischen Hagenau und Weißenburg bei Lobsann, Sulz unterm Wald, Pechelbronn usw. bekannt, und erstreckt sich auch bis in die Pfalz, wo in über 700 m tiefen Bohrungen, die die Unterlage nicht erreichten, ein Wechsel von Mergeln mit Petroleum und Asphalt führenden Sandschichten erschlossen wurde. Die Mergel enthalten im Süden Foraminiferen, während bei Pechelbronn Süßwasserconchylien gefunden wurden. Ueber den Petroleumschichten lagert hier Asphaltkalk mit Süßwasserconchylien, auch Pflanzen und Säugetierresten (Anthracotherium alsaticum), darüber folgt Rupelton.

Die Petroleumschichten sind ferner bei Altkirch im Oberelsaß, südlich Mühlhausen aufgefunden, doch nicht ausbeutefähig, und von Kleinkems und Brunstadt sind ältere eocäne Süßwasserkalke mit Melania Laurae und anderen Süßwasserschnecken bekannt. Mitteloligocäne Strandbildungen mit Konglomeraten, in denen selten auch Fossilien vorkommen, sind an den Gebirgsrändern verbreitet als Küstenkonglomerate (Scharrachberg, Bastberg usw.). Ebenso kommen marine Sandsteine und Sande neben dem Rupelton vor. Das Oberoligocän ist in gewissen Sanden und Sandsteinen mit Pflanzen und Mergeln mit Cyrenen zu erblicken.

Ins Oligocän sind ferner in Süddeutschland gewisse Bohnerze und Süßwasserkalke von nur lokaler Verbreitung zu stellen. Weite Verbreitung besitzen aber im Alpenvorlande Süddeutschlands und der Schweiz die Molassebildungen. Das sind überaus mächtige, oligocäne und miocäne sandige Mergel, mergelige Sandsteine und Konglomerate, zu denen auch die Schweizer Nagelfluh gehört. Die untere marine Meeresmolasse, die in Bayern 600 m mächtig wird, enthält die charakteristischen Arten der Fauna der Schleichsande des Cyrenenmergels im Mainzer Becken, die darüber lagernde 1000 m mächtige brackisch-limnische oder untere Süßwassermolasse die brackische Fauna des Cyrenenmergels, in ihrem oberen Teile aber auch schon miocäne Arten. Gümbel sah die Meeresmolasse als Mitteloligocän, die Brack- und Süßwassermolasse als Oberoligocän an. W. Wolf stellt nach Abzählen einer von ihm untersuchten Fauna beide ins Oberoligocän. Ohne hier den Wert solcher Abzählungen zu kritisieren, scheint die Gümbelsche Ansicht, die untere marine Molasse als Aequivalent der unteren marinen Sande des Cyrenenmergels dem oberen Mitteloligocän zuzurechnen, treffender, denn für die stratigraphische Uebereinstimmung und die Annahme eines Zusammenhanges der Meere, aus denen Cyrenenmergel und Molasse abgelagert wurden, sprechen auch sonst wichtige Beobachtungen. Die untere Süßwassermolasse ist das Aequivalent des oberen Cyrenenmergels und Cerithienkalkes. Die obersten Schichten sind wahrscheinlich schon untermiocänen Alters und entsprechen den Corbicula- und Hydrobienschichten.

Im Pariser Becken besitzt das Oligocän eine wesentlich andere Verbreitung als das Eocän. Es stand nach Norden mit dem belgischen und südenglischen Becken in Verbindung. Das Mitteloligocän transgrediert stark.

Unter dem Unteroligocän (Sannoisien), über den Mergeln mit Pholadomya ludensis, deren obere Schichten bereits Gips enthalten, setzte sich eine Folge von gipsreichen Schichten ab (etwa 50 m mächtig), die als Pariser Gips oder Gips von Montmartre bezeichnet werden. Der Gips tritt in drei Horizonten auf, die durch bunte Mergel getrennt sind. Der oberste ist am mächtigsten (16 bis 18 m) und enthält eine Menge von Säugetierresten (Montmartre). Diese Schichten werden ganz, von anderen auch nur mit ihrem unteren Teile zum obersten Eocän gestellt. Nach Südosten gehen die oberen Gipsmergel in eine gleichalterige lakustrische Ablagerung, den Travertin von Champigny über. — Ueber dem Pariser Gips beginnt das Unteroligocän mit blauen Mergeln, den Marnes supragypseuses, die sich nach oben in bauwürdige Süßwasserkalkmergel mit Conchylien und Wirbeltierresten fortsetzen. Ueber ihnen lagern wiederum unten Cyrenenmergel und oben grüne Tone mit brackischer Fauna. Die nächste Stufe wird von Kalk- und Gipsbänken gebildet, die von den marinen mergeligen Kalksteinen und Mergeln von Sannois bedeckt sind. Diesen letzteren entspricht südlich und östlich von Paris der Calcaire de Brie mit Süßwasserconchylien.

Das Mitteloligocän (Rupélien, Stampien) transgrediert kräftig und zwar dringt das Meer von Norden her weit über Eocän und Kreide übergreifend nach Süden vor. Das wichtigste Glied der Stufe sind die Sande von Fontainebleau (sables supérieurs), die etwa 40 bis 60 m mächtig werden können. Die Ablagerung ist bei Fontainebleau und besonders in der Gegend von Étampes gut aufgeschlossen und studiert. Die Transgression beginnt mit den Austernmergeln (marnes à huîtres), in denen Ostrea cyathula und longirostris in Menge verbreitet sind und stellenweise Platten oder Bänke bilden. Dazu gehört die Molasse von Etrechy, ein Muschelkonglomerat, das auch Cytherea incrassata, Cerithien, Perna, Bayania semidecussata usw. führt. Darüber breiten sich die überaus fossilreichen, eigentlichen Sande von Fontainebleau aus, die man lokal, ähnlich wie auch bei Weinheim, in einzelne Lagen gliedern kann, ohne daß sie als paläontologische Zonen auch anderwärts wieder zu erkennen wären. Unter der Unmenge von Muscheln und Schnecken finden sich auch zahlreiche Fischreste, besonders auch Zähne und Reste von Halitherium. Nach oben tritt der Fossilreichtum zurück und es stellen sich kalkige und kieselige Sandsteinbänke zwischen Sanden ein. Dollfus beobachtete bei Nemour eine Stelle, an der zwischen fossilführenden Sanden eine Kalkbank mit Brack- und Süßwasserfossilien lagert.

Das Oberoligocän (Chattien) beginnt, stellenweise ebenfalls transgredierend, mit den fossilreichen Sanden von Ormoy (4 m), die eine Mischung von oberoligocänen, marinen und brackischen Fossilien einschließen. Darüber folgen bei Étampes Mergel, vorwiegend mit Süßwasserconchylien, die auch zusammen mit

Helix Ramond in dem überlagernden Kalk von Étampes verbreitet sind, daneben mit Anthracotherium, Aceratherium usw. Dieselbe Fauna findet sich in den Mühlsteinbrüchen von Montmorency nördlich von Paris.

Der Kalk von Étampes und der Mühlstein gehören dem unteren Teil der Schichtenfolge an, die mit dem Namen Calcaire de Beauce bezeichnet und an die Basis des Miocäns gestellt wurde. Die Sande von Ormoy mit ihrer oberoligocänen Fauna waren früher noch als oberste Stufe zu den Sanden von Fontainebleau gerechnet worden. Gegenüber der ausgesprochenen Dreiteilung des deutschen marinen Oligocäns blieb im Pariser Becken daher eine Unklarheit, indem die Aequivalente der Sande von Kassel usw. nicht zu erkennen waren. Auf die schon früher ausgesprochene Vermutung, daß im Aquitanien paläontologisch oligocäne und miocäne Schichten vereint seien, ist in neuester Zeit Dollfus zurückgekommen. Er wies vor allem darauf hin, daß die Schichten mit Helix Ramondi als einer ausgesprochen oligocänen Form nach unten anzugliedern seien. Er stellte dann im Anschluß an die deutschen Verhältnisse für das Oberoligocän im Pariser Becken einen neuen Stufennamen auf, das Kassélien. Indessen kann dieser nicht angenommen werden, weil der schon früher von Th. Fuchs aus gleichen Gründen gewählte bessere Name Chattien bereits da war. Der Calcaire d'Étampes mit Helix Ramondi entspricht jedenfalls dem Cerithienkalk des Mainzer Beckens. Die genaue Parallelisierung der französischen Ablagerungen mit dem deutschen Oberoligocän ist noch nicht hergestellt, zurzeit fassen manche französischen Autoren das ganze Aquitanien noch als Oberoligocän auf. Der Vergleich ist schwer durchzuführen, da in Frankreich das marine Oberoligocän sehr zurücktritt.

Die südfranzösischen Phosphorite von Quercy enthalten eine sehr reiche z. T. neueingewanderte Säugetierfauna, aber auch Amphibien und Reptilien. Nur etwa die Hälfte der Arten kommt schon im oberen Teil des Pariser Gipses (bei Montmartre usw.) vor. Die Phosphorite gehören dem Unteroligocän an.

Nummuliten führendes Oligocän ist in Süd- und Westfrankreich verbreitet, so im Becken von Bordeaux, hier werden die marinen mitteloligocänen Mergel, Kalke und Sande wie im Pariser Becken von weißem Kalk mit Land- und Süßwasserconchylien überlagert, dem Calcaire blanc de l'Agenais, der gleichalterig mit dem Kalk von Étampes ist. Der überlagernde Calcaire gris de l'Agenais mit dem Süßwasserkalk von Saucats dürfte dagegen zum Untermiocän zu stellen sein.

Auch in Belgien transgrediert das Unteroligocän über Eocän und obere Kreide. Es beginnt mit marinen fossilreichen Sanden mit den Fossilien des deutschen Unteroligocäns, darüber folgen brackische Ablagerungen, die Sande und Mergel von Baudersem, die grünen Tone von Henis und die Sande von Vieux Joncs. Das Mitteloligocän setzt sich zusammen aus den unteren marinen Sanden von Berg und dem Ton von Boom, das ist der Rupelton, der auch zu oberst noch von Sanden bedeckt sein kann. Das Oberoligocän, welches in Holländisch Limburg in Bohrlöchern nachgewiesen wurde, ist schon erwähnt, es wurde bis Lüttich verfolgt. Im übrigen fehlt Oberoligocän in Belgien.

In England ist das Oligocän im Londoner Becken unbekannt, nur im Becken von Hampshire und auf Wight ist es entwickelt. Die Lower Headon beds gehören dem Obereocän an. Sie gehen ohne scharfe Grenze in die unteroligocänen Middle Headon beds über, die noch brackische Arten des Obereocäns neben neu eintretenden marinen unteroligocänen führen. Darüber liegen Mergel und Sande der Upper Headon beds mit eingeschalteten Brackwasserkalken. Sie sind bedeckt von den Kalken von Bembridge mit Süßwasserconchylien und Säugetierresten, auf welche die Mergel von Bembridge mit Cyrena, Cytherea incrassata und Süßwasserconchylien folgen. Den Abschluß des Oligocäns bilden die Tone und Mergel von Hemstead, die unten Brack- und Süßwasserfossilien, oben aber marine Formen einschließen. Die obersten Schichten dürften noch als unterstes Mitteloligocän anzusehen sein. Das übrige Oligocän fehlt.

Im nordalpinen Gebiet usw. setzt sich, wie schon beim Eocän erwähnt, die sandig-mergelig-schieferige Facies des Flysches fort mit oftmals überwiegend sandiger Entwickelung. Er schließt die Fischschiefer von Glarus ein, die den Fischschiefern des Rupeltons mit Meletta und Amphysile gleichgestellt werden. Auch die Taveyannaz-Sandsteine der Westalpen werden ihm zugerechnet. Neben dem Flysch treten aber auch noch kalkige marine Gesteine im Oligocän in den Alpen auf, in deren unteren Lagen auch noch Nummuliten verbreitet sind (Nummulites Bouillei-Tournoueri, intermedius-Fichteli u. a.).

Ausgezeichnet ist das Oligocän im Vicentinischen entwickelt. Ueber den obereocänen Priabonaschichten beginnt das Unteroligocän 1. mit marinen Sandsteinen und Konglomeraten unter 2. Korallenkalken. Die nächste Stufe bilden 3. vulkanische Tuffe, im Süden auch Tone und Mergel mit reicher Fauna und zu oberst liegen 4. Mergel und Sandsteine, die teilweise flyschartigen Charakter annehmen. Das Mitteloligocän bilden 5. die Schichten von Castel-Gomberto, Kalke, Mergelkalke, auch Sandsteine mit eingeschalteten Basalttuffen. Ihre an Echiniden, Korallen, Mollusken usw. reiche Fauna weist typische Arten des mediterranen Gebietes auf, enthält aber auch solche, die in den Meeressanden des Mainzer Beckens und von Fontainebleau vorkommen. Darüber lagern die 6. oberoligocänen Kalke und Mergel von Malo und 7. die Schioschichten, welch letztere vielleicht schon als miocän zu deuten sind.

Das Oligocän ist ferner meist in der Facies des Flysches an den Rändern der Faltengebirge nach Osten und Süden zu verfolgen. Auch im Mittelmeergebiet (der Thetys) ist es in mariner Entwickelung verbreitet, allerdings nicht so ausgedehnt wie das Eocän.

In Zentralamerika und Mexiko sind an den Küsten marine Oligocänschichten entwickelt. Im Inneren des nordamerikanischen Kontinents sind die Wight River-Schichten terrestrisch ausgebildet und lassen nach der Säugetierfauna

ähnliche Gliederung und nahe Beziehungen zur europäischen Säugetierwelt erkennen.

Das Neogen wird durch die beiden jüngeren Tertiärstufen des Miocän und Pliocän gebildet.

Das Miocän. Der langsame Rückzug der Meere vom eurasiatischen Kontinent, der schon im Oberoligocän einsetzte, und damit das allmähliche Emportauchen des heutigen Festlandes, schreitet weiter fort. Die Faltengebirge, deren Hauptbildungszeit in das jüngere Miocän fällt, erhöhen sich mehr und mehr und aus den Inseln werden Kontinentalmassen. In Norddeutschland war das Meer auf die durch einzelne tiefere Buchten gegliederten Küstengebiete der westlichen Ostsee und der Nordsee beschränkt. In England und im Pariser Becken fehlt Miocän, dagegen ist es an den atlantischen Küsten Westeuropas kräftig entwickelt. Das Mittelmeer hatte während des älteren Miocäns noch eine weite Ausdehnung. Es wurde durch eine von den Alpen durch die Balkanhalbinsel nach Kleinasien und weiter nach Osten sich erstreckende Kontinentalmasse in ein südliches und nördliches (pannonisches) Becken getrennt. Das südliche bedeckte das heutige Mittelmeergebiet und Teile seiner Küsten und setzte sich in die asiatischen Landmassen fort. Das nördliche umsäumte in einem Arm die Alpen und erstreckte sich über die Donauländer und den Norden des schwarzen Meeres über das Kaspische Meer hinaus. Während des Jungmiocäns verringerten und verflachten sich die Becken und an Stelle mariner Bildungen treten solche des Brackwassers. Das Klima war in Mitteleuropa jedenfalls noch wärmer als heute, aber nicht mehr so, daß Palmen und andere tropische Gewächse in den nördlicheren Gebieten gedeihen konnten.

Das klassische Miocängebiet ist das Becken von Bordeaux (Aquitanisches Becken), dessen Fauna indessen noch einer eingehenden Bearbeitung harrt. Das Untermiocän beginnt mit einem Wechsel von marinen und lakustren Schichten (Calcaire gris de l'Agenais. Aquitanien im neueren Sinne nach Dollfus). An der Basis liegen marine Mergel und sandige Kalksteine, auf die die Sande und Sandsteine von Bazas folgen. Die höheren Schichten setzen sich zusammen aus den Süßwasserkalken von Saucats, den Muschelsanden von Lariey mit Mytilus aquitanicus, dem grauen Kalk von Agenais mit Ostrea aginensis und zu oberst wieder aus Süßwasserkalken. Das Mittelmiocän wird durch eine Folge von marinen Muschelsanden gebildet, an deren Basis bei Leognan knochenführende Molasse lagert. Auch das Obermiocän besteht hier lediglich aus marinen Muschelsanden und sandigen Mergeln. Nach Südosten macht indessen die marine Entwickelung mehr und mehr einer brackisch-limnischen Platz, wo das Untermiocän vorwiegend aus Süßwasserkalken mit eingeschalteten marinen Mergeln und Mittel- und Obermiocän aus brackischen Molassemergeln bestehen (Molasse von Armagnac).

In Belgien ist marines Untermiocän unbekannt, es sind im Norden des Landes nur Braunkohlenbildungen verbreitet, deren Entwickelung der rheinischen ähnlich ist. Dagegen findet sich marines Mittel- und Obermiocän, das große Uebereinstimmung mit dem norddeutschen Miocän aufweist. Am Bolderberg bei Hasselt lagern mittelmiocäne fossilleere Sande unter weißen Sanden mit Cerithium lignitarum, Murex aquitanensis usw. (Boldérien). Bei Antwerpen (Anversien) lagert über mitteloligocänen Tonen transgredierend schwarzer Kies und darüber grauer Sand mit Panopaea Menardi und reicher Foraminiferen- und Conchylienfauna, dann schwarze fossilreiche Sande mit Pectunculus pilosus und zu oberst grobe Sande, die wie auch die nächst unteren überaus reich an Walfischresten sind.

In Deutschland hat sich mit dem Beginn des Miocäns das Meer weit nach Norden zurückgezogen. Man kennt marine Miocänschichten aus Jütland, Schleswig-Holstein, Mecklenburg und dem nördlichen Hannover, sowie von Oldenburg und am Niederrhein. Die ältesten Schichten sind die Sandsteine vom Brothener Ufer, die v. Koenen nach ihrer Fauna noch ins Untermiocän stellt. Darüber lagert als Mittelmiocän die Hauptmasse des Holsteiner kalkigen oder eisenschüssigen Sandsteins und dann der obermiocäne Schleswig-Holsteinische Glimmerton. Mittelmiocäne marine fossilführende Glimmertone sind am Niederrhein schon lange bekannt. Ihre weitere Verbreitung und der Zusammenhang mit dem holländischen Miocän ist aber erst in neuerer Zeit durch die zahlreichen Bohrungen nach Steinkohle nachgewiesen worden. Marines Obermiocän ist bis jetzt am Niederrhein nicht gefunden. Außerhalb des Alpenrandes kennt man sonst kein marines Miocän in Deutschland.

Im Mainzer Becken sind die letzten deutlich marinen Einflüsse in der Fauna des oberoligocänen Cerithienkalkes zu erkennen. Der Salzgehalt nahm dann ab, ohne sich zunächst ganz zu verlieren, und die Cerithienkalke gehen, wie oben beschrieben, ohne deutliche Grenze in die Corbiculaschichten und diese wiederum in die Hydrobienschichten über. Ueber die Stellung der beiden letzteren Horizonte, die keine ausgesprochene oligocäne, aber auch keine eigentliche miocäne Fauna einschließen, sind widersprechende Meinungen geäußert worden. Ihr miocänes Alter ist indessen in neuerer Zeit wahrscheinlich geworden durch die Auffindung sicher jungmiocäner Schichten in konkordanter Lagerung über den Hydrobienschichten im östlichen Becken von Frankfurt-Hanau. Demnach sind die Corbiculaschichten und die Hydrobienschichten als untermiocän anzusehen, die nach K. Fischer und W. Wenz noch von 1. jungmiocänen Landschneckenmergeln mit Algen- und Sinterkalken und 2. den Schichten mit Melanopsis narzolina und Melania Escheri var. aquitanica überlagert werden, auf die noch pliocäne (s. u.) Schichten folgen. Die stratigraphisch-paläontologische Beschreibung dieser obermiocänen und pliocänen Ablagerungen steht jedoch noch aus.

Weite Verbreitung besitzt in Deutschland die kontinentale Ausbildung des Miocäns mit Sanden, Kiesen und Tonen, die zum Teil mächtige bauwürdige Braunkohlenlager einschließt. Die miocänen Braunkohlenbildungen liegen am Niederrhein im nördlichen Gebiet unmittelbar über marinem Oberoligocän, sind auch an anderen Stellen nach Wunstorf und Fliegel längs Verwerfung neben letzteren abgesunken. Anderwärts werden sie von den

Kiesen und Sanden der Vallendarer Stufe unterlagert, deren teilhafte Stellung zum Oberoligocän oben erwähnt ist. In der Bonn-Kölner Rheinbucht erreicht die Kohlenformation eine sehr große Mächtigkeit (über 180 m). Bei Rott kommt in den Schichten an der Basis Anthracotherium (Microbunodon) minimum Cuv. vor, eine Art, die wohl noch auf oberstes Oligocän hinweist. Die Ueberlagerung der Braunkohlenstufe durch marine Miocänsande ist bis jetzt noch nirgends nachgewiesen. Eine diesbezügliche Angabe v. Dechens begegnet starkem Zweifel. Außer den älteren sind in der niederrheinischen Ebene jüngere Kohlenablagerungen vorhanden, die zum Pliocän gehören. Zwischen Rhön und Vogelsberg gibt es Aufschlüsse, in denen Kohlen sowohl unter Basalt wie zwischen und über Ergüssen dieses Gesteins liegen. Die unterste Kohlenbildung scheint hier in Verbindung mit Corbiculaschichten aufzutreten, wodurch ihr untermiocänes Alter erwiesen sein dürfte. Diese ältere Kohlenbildung unter Basalt ist auch am Rande des Vogelsbergs, im Westerwald, Meißner usw. verbreitet. Die Kohlen über und zwischen den Basalten sind jünger, vielleicht schon Mittelmiocän. Dem Untermiocän gehören ferner die jüngeren Braunkohlen in der Mark Brandenburg, Mecklenburg, Pommern, Schleswig-Holstein sowie in Sachsen und Schlesien an. Auch in Nordböhmen ist die jüngere Braunkohlenbildung miocän.

Am nördlichen Alpenrande wird das Miocän durch die jüngeren Molassebildungen vertreten, Ablagerungen aus dem Meeresarm, der das Rhonebecken, in dem marine Sande usw. bis an die oberste Grenze des Miocäns auch noch in der Gegend von Lyon entwickelt sind, durch die Schweiz und Süddeutschland mit dem Wiener Becken verband. Man unterscheidet zwei Stufen, die mit Rücksicht auf die oligocänen, petrographisch ähnlichen Ablagerungen obere Meeresmolasse und obere Süßwassermolasse genannt werden.

Die marine Molasse besteht in der Schweiz zu unterst aus grobkörnigen Sanden und Sandsteinen mit Conchylien, dann aus fossilarmen Sanden und zu oberst aus sandigen Mergeln wieder mit reichlicher Fauna. Nach den Versteinerungen scheint die ganze Folge dem Mittelmiocän anzugehören. Am Rigi, in St. Gallen, Appenzell usw. treten die als Nagelfluh bekannten groben Konglomerate auf, an deren Basis sowohl wie auch höher zwischengelagert Mergel und Plattenkalke mit marinen Fossilien vorkommen. Dann folgt die obermiocäne obere Süßwassermolasse mit Säugetierresten, Melania Escheri, Unio flaballatus usw.

Im süddeutschen Alpenvorlande sind die Verhältnisse ähnlich. In Württemberg steigen Molassebildungen bis auf die Höhe der Alb hinauf. In Südbayern ist die mittelmiocäne (obere) marine Meeresmolasse mit Ostrea crassissima, longirostris und vielen anderen Fossilien verbreitet, so im Kaltenbachgraben bei Miesbach, bei Peißenberg usw. Sie geht stellenweise ohne scharfe Grenze in die obere Brackwassermolasse über. Zuoberst lagern limnische Schichten. Oestlich der Isar wird die obere Molasse durch ausgedehnt und mächtig entwickelte blaue Mergel vertreten, die man mit dem österreichischen Vorkommen als Schlier bezeichnet.

In Württemberg lagert die Molasse über Süßwasserkalken und -mergeln, die man als Rugulosaschichten zusammenfaßt. Der untere Teil dieser Stufe mit Helix rugulosa gehört noch zum Oberoligocän, die oberen Schichten dürften untermiocän sein. Der untere Teil der überlagernden Molasse mit Ostrea crassissima usw. ist auch hier ausgesprochen marin, ihr oberer Teil dagegen nimmt brackischen Charakter an. Man gliedert beide Abteilungen lokal in eine Reihe von Schichten und Bänken. Dann folgt die obere Süßwassermolasse, die die Schichten mit Helix sylvana usw. einschließen. An ihrer oberen Grenze liegen die plattigen Mergel von Oeningen am badischen Bodenseerande, die die oben erwähnte, reiche und interessante Fauna und Flora enthalten.

Das Wiener Becken. Darunter versteht man das Gebiet, das sich nördlich der Donau von der böhmischen Gebirgsmasse im Westen bis an den Rand der Karpathen und im Süden des Stromes von der Enge von St. Pölten am Alpenrand entlang bis an das Leithagebirge und die kleinen Karpathen erstreckt. Nach Westen stand es über die Enge von St. Pölten mit dem süddeutschen Molassegebiet, nach Osten dagegen mit dem pannonischen Becken in Verbindung. Man unterscheidet das außeralpine und das inneralpine Becken, die in ihrer Entwickelung mancherlei Verschiedenheiten aufweisen. Das außeralpine Becken liegt in dem Hügellande, das sich zwischen der böhmischen Masse und der Flyschzone ausbreitet. Das inneralpine Becken erstreckt sich südlich von Wien zwischen Alpen und Karpathen, von dem kristallinen Gebirge des östlichen Steiermark um das Leithagebirge bis an die kleinen Karpathen. Die untersten Schichten sind vorwiegend marin, nach dem Pliocän zu nimmt der Salzgehalt des Meeres mehr und mehr ab. Die Ablagerungen werden in drei Stufen gegliedert von unten nach oben: 1. Erste Mediterranstufe, 2. die zweite Mediterranstufe, 3. die sarmatische Stufe oder die Cerithienschichten. Die beiden ersten Stufen werden gewöhnlich als im Alter übereinander folgend und danach als unter- und mittelmiocän angesehen. Von anderen wird das mit Recht bezweifelt, sie sehen beide als annähernd gleichalterig an, nur durch die Art ihrer Entwickelung unterschieden. Die einzelnen Unterstufen sind geradeso im wesentlichen auf Faciesunterschiede begründet also auch ganz oder teilweise gleichaltrig.

Die erste Mediterranstufe enthält vermutlich als älteste Stufe die Schichten von Molt, Sande und Mergel mit brackischer Fauna mit Cerithium margaritaceum und plicatum. Weiter die groben, hellen Sande von Loibersdorf mit vielen Fischzähnen und Ostrea crassissima und anderen marinen Arten; die Sande von Gauderndorf, feinkörnig mit dünnschaligen Muscheln (Tellinensande), teilweise auf Granit transgredierend. Ferner die Schichten von Eggenburg, Sande und Sandsteine, überlagert von Kalksandsteinen. Sie transgredieren ebenfalls und schließen eine reiche marine Fauna ein, die als mittelmiocän angesehen wird. Dann folgt als jüngstes Glied der Schlier, graue schieferige oder plastische

Mergel (Tegel) mit Foraminiferen, marinen Conchylien, Fischen usw. Schlier ist auch im inneralpinen Becken gefunden, doch nicht im engeren Becken von Wien, sondern im Osten. Es kommen darüber auch noch jüngere Schichten vor, die vermutlich Aequivalente der sarmatischen Stufe sind.

In der zweiten Mediterranstufe des inneralpinen Beckens (der Wiener Bucht) unterscheidet man als facielle, teilweise horizontal ineinander übergehende, auch wechsellagernde Bildungen:

Den Tegel von Baden, Soos, Vöslau. Es ist ein plastischer Ton mit Foraminiferen und vielen Schnecken, besonders Pleurotomen, weniger Muscheln, auch Einzelkorallen. Die sandigen Mergel von Geinfarn und Grinzing mit zahlreichen Muscheln und Schnecken. Dann das an den Rändern der Bucht transgredierende Leithakonglomerat mit großen Austern und Seeigeln. Der Leithakalk mit Nulliporen-, Bryozoen-, Korallenkalk, mit reicher Schneckenfauna, auch mit zwischengelagerten an Foraminiferen reichen Mergeln, dazu der mürbe Bryozoenkalk mit Fischzähnen, Austern, Pecten, Foraminiferen usw. Ferner die Sande von Neudorf a. d. March und die Sande von Plötzleinsdorf (Tellinensande).

Die sarmatische Stufe besteht aus Sanden, oolitischen Kalksteinen und Tegeln (sandigen Tonen oder Mergeln). Die Fauna ist gegenüber den älteren Schichten monoton, einer geringen Zahl von Arten (ca. 50) steht aber eine ungeheure Zahl der Individuen gegenüber. Es ist der Charakter einer marinen Reliktenfauna, die sich an ein sich aussüßendes Becken angepaßt hat. Korallen, Echinodermen, Brachiopoden, Cephalopoden, Crustaceen und Haifische fehlen ganz. Dagegen herrschen die Cerithien in Unmenge neben Cardium, Mactra, Tapes, Trochus, Rissoa usw. und Süßwasserconchylien, Paludina, Melanopsis usw. Von Wirbeltieren finden sich Säugetiere, besonders Robben und Schildkröten. Die sarmatischen Schichten sind in der Wiener Bucht nicht sehr verbreitet, gewinnen aber im pannonischen Becken bis weit nach Rußland hinein und an der unteren Donau ausgiebige Entwickelung.

Es folgen nun im Wiener Becken noch jüngere Ablagerungen, die beim Pliocän behandelt sind.

In Galizien ist das Miocän ähnlich wie im Wiener Becken entwickelt. Den untersten Schichten gehören die Gips- und Salzablagerungen, auch mit etwas Kalisalz von Wieliczka und Kalusz an.

In Nordamerika sind an der atlantischen Küste sandig- mergelige marine Miocänbildungen entwickelt (Chesapeak-Gruppe), während im Innern säugetierreiche Festlandsbildungen (Loup-Fork-Gruppe, Colorado, Nebraska) verbreitet sind. In Südamerika sind die patagonischen Schichten miocän.

Das Pliocän. Der Rückzug des Meeres ist mit dem Beginn der Pliocänzeit soweit gediehen, daß die heutigen Kontinente im wesentlichen bereits über dem Wasser lagen. Nur in gewissen Küstengebieten und tiefen Buchten finden sich noch marine Sedimente. Während solche in Deutschland ganz fehlen, griff das Meer über den Südoststrand Englands und über den Nordrand von Belgien und Holland wieder auf beschränktes Gebiet über, so auch in Nordfrankreich. Mächtigere Marinschichten finden sich ferner noch an den Rändern des Mittelmeeres, im nordwestlichen Afrika, in Spanien, im unteren Teil des Rhônebeckens, in Italien, besonders in der norditalienischen Tiefebene, aber auch am Rande des Appenin entlang über Rom bis nach Süditalien; weiter in Griechenland und am Schwarzen und Kaspischen Meer. Auf den sich erhebenden Kontinenten setzte kräftige Erosionstätigkeit ein, es entstanden Binnenseen und Flußtäler und in manchen Fällen kann man aus den Ablagerungen schon die Uranfänge heutiger Flußtäler erkennen.

Das Klima in Europa war zu Beginn des Pliocäns wohl noch etwas wärmer, gegen Ende aber wenig anders als das heutige.

In England sind die marinen pliocänen Ablagerungen des Crag in Kent, Essex, Suffolk und Norfolk in einer der belgisch-holländischen sehr ähnlichen Entwickelung ausgebreitet. Als älteste Ablagerungen sieht man nach Harmer die Schichten von Lenham an der Küste von Kent an, deren Fauna noch deutliche Beziehungen zum Miocän erkennen läßt (Diestien in Belgien). Hier wie in der Zeit des älteren Crag muß noch eine Verbindung nach und Einwanderung aus etwas südlicheren Meeren vermutet werden. Es folgt der coralline Crag (belgisch Casterlien), er besteht, vielfach auf London clay lagernd, unten aus Muschelsanden und oben aus eisenschüssigen Kalken und wird lokal in eine Reihe (8) von Unterabteilungen gegliedert, ohne daß in deren Fauna entscheidende Altersverschiedenheiten zum Ausdruck kommen. Letztere enthält, wie erwähnt, neben einer Anzahl nordischer Arten (Cyprina islandica) viele, die noch auf etwas wärmeres Wasser hinweisen: Bryozoen, Seeigel, Brachiopoden und Conchylien, meist in Steinkernen, auch Fischotolithen. Zu oberst liegt der Red Crag, von dem Harmer drei Stufen unterscheidet, die aber nirgends übereinander liegen, sondern sich einer Transgression des Meeres entsprechend von Süden nach Norden folgen. Sie weisen dadurch Unterschiede in der Fauna auf, daß sich mehr und mehr der nordische Charakter ausprägt, indem die Formen südlicher Meere aussterben. Zu unterst liegt 1. die Stufe von Walton mit Neptunea contraria und von Oakley mit Mactra obtruncata (Scaldisien und Poederlien in Belgien); 2. die Schichten mit Mactra constricta (Newbournien) und endlich 3. die Schichten mit Cardium groenlandicum (Butleyen). Noch jüngere marine Bildungen werden nach ihrer arktischen Fauna ins Quartär gestellt.

Im Wiener Becken folgt auf die sarmatischen Ablagerungen die Pontische Stufe oder die Congerienschichten. Es sind vorwiegend Sande und Tegel, an den Rändern gelegentlich auch Konglomerate und Kalke, die im Wiener und pannonischen Becken weit verbreitet sind. Die eigenartige brackische Fauna bietet manchen Vergleich mit den Ablagerungen am Schwarzen und Kaspischen Meer. Nach Th. Fuchs unterscheidet man im Wiener Becken: 1. Uebergangsschichten mit Tapes gregaria, 2. Sande und Kiese mit Congeria Hoernesi unter Tonen mit vielen Cardien, 3. Tone

mit Congeria Partschi und 4. Sande und Tone mit Congeria subglobosa, Cardium conjungens, Melanopsis vindobonensis u. a. Diese Pontische Stufe wird von manchen als oberste Stufe des Miocäns angesehen.

Jüngere Brack- und Süßwasserbildungen sind im eigentlichen Wiener Becken nur noch schwach entwickelt. Dagegen trifft man solche im Osten und auf dem Balkan, es ist die Levantinische oder Paludinenstufe. Wo sie im Wiener Becken vorkommt, besteht sie aus Süßwasserkalken mit Helix und Planorbis. Im Osten sind es Tegel und Sande mit einer Unmenge von Paludinen und Unionen. Weit verbreitet sind im Wiener Becken über den Congerienschichten oft in großer Mächtigkeit fluviatile Sande und grobe Kiese, die Belvedereschotter (Thracische Stufe). Sie enthalten Säugetierreste mit Hipparion, Dinotherium, Mastodon, Rhinoceros usw., deren Arten einmal mit den Ablagerungen von Pikermi bei Athen ident oder verwandt sind, andererseits aber auch mit den Dinotheriumsanden Rheinhessens, mit denen sie ja außerdem petrographisch große Aehnlichkeit aufweisen, übereinstimmen.

In Nordamerika ist marines Pliocän am Golf von Mexiko und auf Florida entwickelt. Im Innern sind terrestrische Bildungen mit Säugetierfauna (Mastodon, Rhinoceros, Elephas usw.) verbreitet.

Fluviatile und limnische Ablagerungen sind in Deutschland über weite Gebiete entwickelt. In Westdeutschland breiteten sich mit dem Beginn des Pliocäns, wahrscheinlich über sehr weiter durch Erosion erzeugter Fläche Flußablagerungen aus. Wunstorf und Fliegel glauben am Niederrhein in dieser Zeit bereits die Anfänge der Talbildung des Urrheines, der Urmosel und Urmaas erkennen zu können. Indessen ist die Herkunft einer kräftigen Wasserader von den Alpen her erst in dem ältesten Diluvium bewiesen.

Für die als altpliocän angenommenen Flußschotter am Niederrhein sind gewisse Kieselgesteine charakteristisch, die neben weißen Quarzgeröllen verkieselte Kalkoolithe, schwarze Lydite und verkieselte Jurafossilien führen, man hat nach ihnen diese Schichten mit Erich Kaiser als Kieseloolithstufe bezeichnet. Sie stellt petrographisch vielfach einen leitenden Horizont dar. Die Herkunft dieser Gesteine vermutet man im ostfranzösischen Juragebiet. Sie sind am Rhein nach Süden bis in die Eppelsheimer Sande, die in Rheinhessen vielfach über Corbicula und Hydrobienschichten lagern, verfolgt, womit man deren Stellung in das Unterpliocän begründet hat. Es ist aus der Kieseloolithstufe eine Flora bekannt, die noch Formen wärmeren Klimas und damit noch zweifellose Verwandtschaft mit dem Miocän aufweist. Durch die Verbreitung solcher Kieseloolithe, deren Ausbreitung man also ausschließlich an die Basis des Pliocäns verlegt, unter Braunkohlen ist, wie oben erwähnt, auch deren pliocänes Alter bewiesen. Solche junge Braunkohlen, teils in sehr wohl bauwürdigen Lagern, sind sowohl in der niederrheinischen Ebene wie auch in Hessen in der Wetterau und am Main entwickelt.

In der südlichen Wetterau, bei Frankfurt usw. sind über dem Miocän mit Melanopsis narzolina als Unterpliocän die Schicht mit Hydrobia slavonica mit Braunkohlen (Ginnheim, Bommersheim, Salzhausen) angesprochen worden. Darüber folgen bei Praunheim die Prosostheniennergel. Das obere Pliocän mit oder ohne Kohlen ist im übrigen in der Wetterau und Mainniederung in Form von stellenweise sehr mächtigen, durchaus kalkfreien Tonen und Sanden, auch Kiesen mit vorwiegend weißen Quarzen ausgebildet, die als Ablagerungen aus Binnenseen gedeutet worden sind. Allein nach dem starken petrographischen Schichtenwechsel muß man wohl auch sie als Flußablagerungen in weiten Ebenen, wo sich viele Altwasser bilden konnten, ansehen. In ihnen ist bei Frankfurt eine reiche oberpliocäne Flora aufgefunden worden. Fluviatiles Pliocän, für das die Kalkfreiheit im allgemeinen charakteristisch ist, ist im übrigen allenthalben in Deutschland verbreitet, dazu gehören auch die Schotter mit Mastodonresten, die in den deutschen Flußgebieten bis nach Thüringen hin wohlbekannt sind und auch in Ostdeutschland vorkommen.

In der Fauna des Pliocäns unterscheidet M. Schlosser drei Stufen: zuunterst 1. eine mit Mastodon longirostris, Hipparion gracile, Rhinoceros Schleiermacheri; 2. eine mit Mastodon Borsoni und arvernensis, Hipparion grassum, Rhinoceros leptorhinus und 3. eine mit Mastodon arvernensis, Elephas meridionalis und Equus stenonis.

Berühmt durch die reichen Funde sind unter anderen die schon im Vergleich mit den Eppelsheimer Sanden genannten Knochentone von Pikermi bei Athen und die von der Insel Samos mit vielen afrikanischen Arten.

6. Nutzbare Mineralien und Gesteine. Wo die Tertiärformation in einiger Mächtigkeit entwickelt ist, findet auch in der Regel irgendeine Ausbeute für technische Zwecke statt. In mächtigen Brüchen wird an vielen Orten der Abbau von Gesteinen für den Bau betrieben, so nach Kalksteinen (z. B. Pariser Grobkalk) und Sandsteinen. Erstere und die mehr oder minder kieselsäurehaltigen (tonigen) Mergel werden besonders auch zur Herstellung von Zement (z. B. im Mainzer Becken, bei Stettin u. a.) und zu hydraulischen und gewöhnlichen Mörteln gewonnen. Die Tone werden zur Herstellung von feuerfesten Steinen, Porzellanerden, zur Anfertigung von Steingut und feinerem Porzellan verwendet. Quarzite und quarzfreie Sande dienen zur Anfertigung von Dinassteinen usw. Endlich werden bergmännisch Kohlen, von denen sich viele zur Brikettfabrikation eignen, Bohnenerze und Stein- und Kalisalz gewonnen. Die weitverbreiteten Eruptivgesteine werden als Hartgesteine besonders zum Straßenbau, aber auch oft zum Hochbau oder Wasserbau abgebaut, für letztere Zwecke sind besonders Laven und Tuffe bevorzugt.

Literatur. *Aus der reichen Literatur seien nur einige Werke angeführt, in denen sich eine zusammenfassende Darstellung der Tertiärformation findet. In erster Linie sind die ausführlichen französischen Werke: Traité de Géo-*

logie von **A. de Lapparent** *und von* **E. Haug** *zu nennen, die auch im Vorstehenden außer der Spezialliteratur benutzt worden sind. Aus der deutschen Literatur seien* **Em. Kaysers** *Lehrbuch der Geologie und das von* **F. Toula** *sowie* **R. Lepsius,** *Geologie von Deutschland genannt.*

A. Steuer.

Thénard

Ludwig Jakob.

Thénard wurde am 4. Mai 1777 in Nogent geboren und ist am 20. Juni 1857 in Paris gestorben, wo er, aus der Schule Vauquelins hervorgegangen, zuerst Professor an der Ecole polytechnique, dann am Collège de France und der Faculté des sciences war. Er gehörte zu den einflußreichsten Chemikern Frankreichs sowohl infolge seiner Lehrtätigkeit wie durch ausgezeichnete Experimentaluntersuchungen, welche die Gebiete der anorganischen, organischen, physiologischen und physikalischen Chemie bereichert haben. Sie sind fast ausschließlich in den Annales de Chimie et de Physique veröffentlicht. Besonders zu nennen ist seine Entdeckung und gründliche Erforschung des Wasserstoffsuperoxyds; ferner die von ihm und Gay Lussac ausgeführte denkwürdige Untersuchung über die Alkalimetalle: eine Arbeit, durch die Davys gleich gerichtete Forschungen wesentlich ergänzt wurden.

E. von Meyer.

Thermen.

Thermen sind warme Quellen, deren Temperatur das ganze Jahr hindurch höher ist als die mittlere Jahrestemperatur des betreffenden Ortes. Vgl. den Artikel „Quellen".

Thermochemie.

1. Begriff, Nomenklatur, Einheiten, Schreibweisen usw. 2. Chemische Thermodynamik: a) Gesetz von der Erhaltung der Energie. b) Zweiter Hauptsatz. c) Anwendung des zweiten Hauptsatzes. d) Nernsts Wärmetheorem. 3. Spezielle anorganische Thermochemie: a) Bildungswärmen einiger Nichtmetallverbindungen. b) Einiger Metallverbindungen. 4. Schmelz-, Verdampfungs-, Umwandlungs- und Lösungswärmen. 5. Thermochemie der Ionen: a) Thermoneutralität der Salzlösungen. b) Neutralisationswärmen. c) Verdünnungswärmen; Dissoziationswärmen. 6. Thermochemie kolloidaler Körper. 7. Thermochemie organischer Körper.

1. Begriff, Nomenklatur, Einheiten, Schreibweisen usw. Die Thermochemie behandelt die Beziehungen zwischen der Wärmelehre und der Chemie, also die Wärmeentwickelung, welche die chemischen Umsetzungen begleitet, ferner die Verschiebungen der chemischen Gleichgewichte mit der Temperatur und die Zusammenhänge zwischen thermischen Größen und der chemischen Affinität.

Die gewöhnlichen chemischen Reaktionsgleichungen, die nur den Umsatz des Stoffes berücksichtigen, sind unvollständig und einseitig; durch Hinzunahme der die Reaktion begleitenden „Wärmetönung" werden sie zugleich Formeln für den Energieumsatz. Unter Wärmetönung oder Reaktionswärme, meist mit Q, auch q (quantitas) bezeichnet[1]), versteht man die positive oder negative Wärmemenge, die pro Einheit der sich umsetzenden Stoffe frei wird; sie ist, wie wir sehen werden, bei gleichbleibenden äußeren Bedingungen konstant und für die betreffende Reaktion charakteristisch, vorausgesetzt, daß die sich umsetzenden Stoffe scharf definiert sind. Entwickelt eine Reaktion Wärme, so heißt sie exotherm, kühlt sich das System bei der Reaktion ab, d. h. wird Wärme gebunden, so heißt die Reaktion endotherm. Man bezieht die Wärmetönungen meist auf die rationellen chemischen Einheiten, nämlich das Grammolekül (Mol) oder auch das Grammäquivalent; dadurch werden die verschiedenen Reaktionsformeln angehängten Wärmetönungen miteinander direkt vergleichbar. Die Wärmetönung wird in weitaus den meisten Fällen kalorimetrisch bestimmt oder auf Umwegen aus anderen kalorimetrischen Daten abgeleitet (s. unter 2a Gesetz der konstanten Wärmesummen S. 1099). Manche, der direkten Bestimmung gar nicht oder nur ungenau zugängliche Daten können aus der Verschiebung von Gleichgewichten mit der Temperatur abgeleitet werden (s. unter 2c Anwendungen des zweiten Hauptsatzes S. 1102. S. auch den Artikel „Energielehre").

Ist in einer thermochemischen Gleichung der Aggregatzustand eines sich umsetzenden Körpers zweifelhaft, so muß man ihn bezeichnen, da die Wärmetönung mehr oder weniger von der Erscheinungsform der reagierenden Stoffe abhängt. Die Bezeichnung geschieht durch besondere Schreibweisen für die verschiedenen Aggregatzustände, deren aber mehrere nebeneinander in Gebrauch sind, oder besser durch Anhängung von Indizes wie gasf. oder fl. Das

[1]) Wählt man, wie z. B. häufig bei Schmelz- und Verdampfungswärmen, das Gramm als Einheit, so schreibt man meist q; wie man auch die auf ein Gramm und die auf ein Mol bezogenen spezifischen Wärmen als c und C unterscheidet.

Gleiche gilt für feste Körper, die in verschiedenen Modifikationen vorkommen können; man unterscheidet also z. B. S_{mon} und S_{am}. Befinden sich die reagierenden Stoffe in Lösung, so fügt man am besten die Mole Lösungsmittel, in denen ein Mol aufgelöst ist, zu; z. B. NaCl, 200 H_2O. Eine Verwechselung mit Hydraten wie $Na_2SO_4 . 10\ H_2O$ ist kaum zu befürchten. Handelt es sich um so verdünnte Lösungen, daß die Wärmetönung durch weitere Verdünnung nicht mehr geändert wird, so hebt man das durch das Symbol „aq." hervor. Beispiele siehe am Schluß des ersten Abschnitts.

Da die Genauigkeit der thermochemischen Messungen 1 bis 2 Promill selten übersteigt, sind die früher nebeneinander gebräuchlichen W ä r m e e i n h e i t e n: die mittlere Kalorie (0 bis 100°) und die gewöhnliche Kalorie (Zimmertemperatur, etwa zwischen 15 und 25°) der jetzt allgemein angenommenen 15°-Kalorie praktisch gleich. Nur die (übrigens ziemlich selten benutzte) Nullpunktskalorie ist außerhalb der Versuchsfehler größer. In neuerer Zeit schließt man die genauen Messungen vielfach durch elektrische Eichung der kalorimetrischen Apparatur an das c-g-s-System an, mißt also streng genommen nicht in kal., sondern in Ergs oder J o u l e s. Näheres siehe im Artikel „K a l o r i m e t r i e". Da der Umrechnungsfaktor von Joules in Kalorien, das mechanische Wärmeäquivalent, wie es scheint, mit einer etwas größeren Unsicherheit behaftet ist als einige moderne thermochemische Messungen, ziehen manche Forscher die Angaben in Joules vor. Als Umrechnungsfaktor verwendet man meist, nach Vereinbarung, den Wert 4,189 (oder 1 Joule = 0,23865 15°-Grammkalorie); doch scheint eine etwas kleinere Zahl, etwa 4,186, richtiger zu sein.

Da die auf das Mol oder das Grammäquivalent umgerechneten Wärmetönungen meist recht große Zahlen sind, pflegt man als Wärmeeinheit das Tausendfache, die K i l o g r a m m k a l o r i e (K a l.) oder das K i l o j o u l e (K. J.) zu benutzen.

Je nach dem chemischen Vorgang bezeichnet man die Wärmetönung als Bildungswärme, Neutralisations-, Dissoziations-, Hydratations-, Lösungs-, Fällungs-, Umwandlungs-, Verbrennungswärme usf.; doch sind die einzelnen Kategorien selbstverständlich nicht immer streng zu scheiden.

Ueber das Vorzeichen der Wärmetönungen, das ja Definitionssache ist, ist zu bemerken, daß die Chemiker die von einem System entwickelte Wärmemenge als positiv rechnen, während die theoretischen Physiker meist die von dem System aufgenommene Wärmemenge mit + Q bezeichnen.

In den folgenden Beispielen wird nach chemischer Art gerechnet: + 136,9 Kal. werden frei, wenn sich bei Zimmertemperatur zwei Mol Wasserstoff mit einem Mol Sauerstoff verbinden usf.

Beispiele: $2H_2 + O_2 = 2H_2O_{fl.}$ + 136,9 Kal. (Bildungswärme; Verbrennungswärme).
NaOH, aq. + HCl, aq. = NaCl, aq. + 13,75 Kal. oder abgekürzt geschrieben:
(NaOH, HCl, aq.) = + 13,75 Kal. (Neutralisationswärme).
$H_2O_{fl.} = H^{\cdot} + OH' - 13{,}8$ Kal. (Elektrolytische Dissoziationswärme).
$N_2O_{4\,gasf.} = 2NO_{2\,gasf.} - 12{,}5$ Kal. (Thermische Dissoziationswärme).
$Na_2SO_4 + 10H_2O_{fl.} = Na_2SO_4.10H_2O + 18{,}8$ Kal. (Hydratationswärme).
$HCl_{gasf.} + 300\ H_2O = HCl,\ 300\ H_2O + 17{,}32$ Kal. (Lösungswärme).
$AgNO_3$, aq. + NaCl, aq. = AgCl + $NaNO_3$, aq. + 15,9 Kal. oder abgekürzt als Ionenformel: ($Ag^{\cdot}$, Cl', aq.) = + 15,9 Kal. (Fällungswärme).
NaCl, 10 H_2O + 40 H_2O = NaCl, 50 H_2O + 0,53 Kal. (Verdünnungswärme).
$S_{mon.} = S_{rh.} + 0{,}08$ Kal. (Umwandlungswärme).
$C_{12}H_{22}O_{11} + 6\ O_2 = 6\ CO_2 + 11\ H_2O_{fl} + 56{,}614$ K.J. (Verbrennungswärme).
(Rohrzucker).

2. Chemische Thermodynamik. S. auch den Artikel „C h e m i s c h e E n e r g i e". 2a) G e s e t z v o n d e r E r h a l t u n g d e r E n e r g i e. Der erste Hauptsatz der Energetik oder Thermodynamik, das Gesetz von der Erhaltung der Energie, ist das Fundament der gesamten Thermochemie. Aus dem Gesetz folgt zunächst, daß jedem Vorgang unter gleichen äußeren Bedingungen (Druck, Temperatur, Konzentration) stets ein und dieselbe Wärmeentwickelung bezw. Wärmebindung entspricht, ferner daß jeder Vorgang bei der Umkehrung die gleiche Wärmetönung, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen liefert. Wenn also die Fällungswärme des Silberchlorides in verdünnter Lösung bei Zimmertemperatur + 15,9 Kal. beträgt, so werden, wenn man ein Mol AgCl in Wasser auflöst, auch 15,9 Kal. verbraucht oder —15,9 Kal. entwickelt. Da diese Lösungswärme, der zu geringen Löslichkeit wegen, nicht direkt bestimmbar ist, benutzt man den umgekehrten Vorgang, die Fällung, um die Wärmetönung zu finden. Entsprechend wird bei vielen, einer direkten kalorimetrischen Messung nicht zugänglichen Reaktionen verfahren.

Eine weitere, wichtige Folgerung aus dem ersten Hauptsatz ist, daß die Wärmetönung einer Reaktion unabhängig sein muß von dem Weg oder den Umwegen oder Etappen, die man macht. Wenn man z. B. auf metallisches Natrium verdünnte Salzsäure einwirken

läßt, erhält man dieselbe Wärmetönung, als wenn man das Metall in Wasser löst, die entstehende Natronlauge mit Salzsäure neutralisiert und die beiden dabei gemessenen Wärmetönungen addiert, also von denselben Stoffen ausgehend und bei denselben endend, die Reaktion in zwei Etappen vor sich gehen läßt. Würde man z. B. auf dem zweiten Wege eine (außerhalb der Versuchsfehler) größere Wärmetönung erhalten, so könnte man (wenigstens theoretisch) eine Vorrichtung konstruieren, die den Vorgang auf dem ersten, direkten Wege rückgängig macht, wozu man weniger als die entwickelte Wärmemenge brauchen würde. Man würde also, bei den Ausgangsstoffen wieder angelangt, eine gewisse Wärmemenge aus Nichts gewonnen haben, hätte also ein chemisches Perpetuum mobile konstruiert, das ohne Arbeitsaufwand kontinuierlich Energie erzeugen könnte; das ist aber erfahrungsgemäß unmöglich.

Die geschilderte Folgerung aus dem ersten Hauptsatz nennt man das G e s e t z d e r k o n s t a n t e n W ä r m e s u m m e n. Es ist bereits 1840 von dem deutsch-russischen Thermochemiker G. H. Heß aufgestellt, bevor das umfassendere Gesetz von der Erhaltung der Energie bekannt war. Es war für Heß ein reiner Erfahrungssatz, den er aus einer großen Zahl von Beobachtungen als allgemein gültig ableitete. So fand Heß z. B. die Auflösungswärme von Zink in verdünnter Schwefelsäure zu 2529 Kalorien. Er berechnete die Größe aus der Bildungswärme von Zinkoxyd und der Neutralisationswärme des Oxyds mit Schwefelsäure und zog die Bildungswärme des Wassers ab:

(Zn,O) =	+5291
+(ZnO,H_2SO_4)	+1609
—(H,O) =	−4350
(Zn,H_2SO_4) =	+2550

Die Uebereinstimmung des berechneten und des direkt gefundenen Wertes ist genügend.

Das Gesetz von Heß wird in zahllosen Fällen benutzt, um Wärmetönungen abzuleiten, die direkt nicht meßbar sind, weil die Reaktionen zu langsam oder unvollständig verlaufen, wie es namentlich bei der Umsetzung organischer Stoffe der Fall ist. Die Bildungswärme einer organischen Verbindung aus den Elementen ist z. B. in keinem einzigen Fall direkt zu erhalten, wohl aber allgemein aus den Verbrennungswärmen auf einem Umweg, mit Hilfe des Gesetzes der konstanten Wärmesummen. Verbrennt man im Kalorimeter einmal die Verbindung, ein zweites Mal die Elemente, aus denen die Verbindung sich aufbaut, so ist die Differenz beider Wärmetönungen die Bildungswärme. Denn wir können uns die Verbrennung der Verbindung in zwei Etappen vor sich gehend denken: erstens Zerlegung in die Elemente, wobei die Wärmetönung gleich der negativen Bildungswärme ist; zweitens Verbrennung dieser Elemente. Die Summe der beiden Wärmetönungen ist gleich der Verbrennungswärme der Verbindung; die einzige Unbekannte der Gleichung, die Bildungswärme, ist also als Differenz der Verbrennungswärme der Komponenten, der Elemente, und der Verbindung leicht zu berechnen. Näheres siehe unter 7 „Verbrennungswärme" S. 1119. Als Beispiel für die Anwendung des Satzes auf anorganische Reaktionen mag das mit den Originalzahlen von Heß oben angeführte dienen.

Das Gesetz von der Erhaltung der Energie gibt uns eindeutige Auskunft über die A e n d e r u n g d e r W ä r m e t ö n u n g m i t d e r T e m p e r a t u r, wobei vorausgesetzt ist, daß der Reaktionsverlauf durch die Temperaturänderung in keiner Weise tangiert wird. Sei die spezifische Wärme des Systems vor der Reaktion C, nachher C′, sei ferner die Wärmetönung bei der Temperatur t_1 gleich Q_1, bei der Temperatur t_2 gleich Q_2. Um das Anfangssystem von der spezifischen Wärme C und der Temperatur t_1 in das Endsystem von der spezifischen Wärme C′ und der Temperatur t_2 überzuführen, kann man zwei Wege einschlagen: man kann das Anfangssystem von t_1 auf t_2 erwärmen und die Reaktion bei t_2 vor sich gehen lassen; alsdann wird die Wärmemenge $Q_2 - C\,(t_2 - t_1)$ entwickelt. Oder man läßt zuerst die Reaktion vor sich gehen und erwärmt dann erst auf t_2. In diesem Fall werden $Q_1 - C'\,(t_2 - t_1)$ Kal. entwickelt. Da Ausgang und Ende in beiden Fällen die gleichen sind, muß nach dem ersten Hauptsatz auch die Wärmetönung die gleiche sein; also ist

$$Q_2 - C\,(t_2 - t_1) = Q_1 - C'\,(t_2 - t_1) \text{ und}$$

$$\frac{Q_2 - Q_1}{t_2 - t_1} = C - C' \text{ oder } \frac{dQ}{dT} = C - C' \quad 1)$$

$$\text{und } \frac{dq}{dT} = c - c'.$$

Beispiele: Die spezifische Wärme von Eis ist in der Nähe von 0° c = 0,49, diejenige des Wassers c′ = 1,01. Also muß die Schmelzwärme des Eises pro Gramm (—q) für jeden Grad unter Null um 0,52 abnehmen. Man hat bei —6,56° pro Gramm Eis —76,01 g-kal. gefunden, während der beste Wert für 0° —79,67 g-kal. ist. Daraus berechnet sich c—c′ zu 0,56!

Die Erstarrungswärme, das ist diejenige Wärmemenge, die sich entwickelt, wenn die unterkühlte Schmelze fest wird, ist meist leichter zu bestimmen als die Schmelzwärme. Wenn man die Schmelzwärme braucht, wird man also häufig, besonders bei organischen

Stoffen, die Erstarrungswärme messen. Der Unterschied beider Größen Schmelzwärme — Erstarrungswärme ist $(t_{Schm.} - t_{Erst.}) \cdot (c_{fl} - c_{fest})$.

Arbeitet man mit verdünnten Lösungen, so sind die Wärmetönungen von der Temperatur im allgemeinen wenig abhängig, da sich die spezifische Wärmen vor und nach der Reaktion kaum zu unterscheiden pflegen. Für die Neutralisationswärmen hat Julius Thomsen, dem wir die besten anorganischen Wärmemessungen verdanken, die Temperaturabhängigkeit und die spezifischen Wärmen der betreffenden Lösungen besonders genau bestimmt.

Die spezifische Wärme der Lösung NaOH, 100 H_2O ist 0,968, diejenige der Lösung HCl, 100 H_2O 0,964; die bei der Neutralisation entstehende Lösung NaCl, 201 H_2O besitzt die spezifische Wärme 0,978. Die Wärmekapazitäten der je ein Mol Substanz enthaltenden Lösungen sind vor der Reaktion 1781 + 1770 = 3551 Kal., nach der Reaktion 3596 Kal.; also muß die Neutralisationswärme von NaOH und HCl pro Grad um 3596—3551 = 45 Kal. abnehmen. In der Tat fand Thomsen bei 10,14° pro Mol 14247 Kal. und bei 24,60° 13627 Kal., also pro Grad Temperatursteigerung eine Abnahme von 43 Kal.!

Wärmeentwickelung und äußere Arbeit. Ist ein Vorgang mit Volumvermehrung verbunden, wie jede Verdampfung oder viele Reaktionen, an denen Gase oder Dämpfe teilnehmen, so wird äußere Arbeit geleistet, falls der Druck nicht konstant gehalten wird; umgekehrt wird äußere Arbeit gewonnen, wenn bei dem Vorgang eine Volumverminderung eintritt, wie bei der Kondensation oder der Bildung fester und flüssiger Körper aus Gasen. Um die Reaktionswärme bei konstantem Druck zu erhalten, muß man also zu der direkt gefundenen Wärmetönung das thermische Aequivalent der äußeren Arbeit addieren, bezw. es von der Bruttowärmetönung abziehen. Bezieht man die Wärmetönung auf ein Mol, so ergeben sich folgende einfache Formeln: Ist V das Volumen eines Mols Gas, P der Atmosphärendruck, gegen den bei der Reaktion Arbeit geleistet wird, so ist die Arbeit P.V oder nach dem bekannten Gasgesetz (vgl. den Artikel „Gase") gleich RT. Da R in kalorischem Maß = 1,985 g-kal . T^{-1} ist, ist die für jedes Mol Gas, das bei der Reaktion entsteht, geleistete Arbeit = ca. 2 T oder bei Zimmertemperatur = 0,58 Kal. Ist Q_v die Wärmetönung bei konstantem Volumen, Q_p diejenige bei konstantem Druck und entstehen n Mole Gas, so gilt also die Gleichung:

$$Q_p = Q_v - n \cdot 0{,}58 \text{ Kal.} \qquad 2)$$

Beispiel: Thomsen fand, als er Wasserstoff bei konstantem Druck verbrannte, die Bildungswärme von einem Mol fl. Wasser (18,016 g) bei ca. 18° (Q_p) zu 68,41 Kal. Mixter verbrannte Knallgas in einer Bombe, also bei konstantem Volumen und fand 67,51 Kal. Da bei der Bildung von einem Mol Wasser 1½ Mole Gas verschwinden, sollte die Differenz $Q_p - Q_v = 1\frac{1}{2} \cdot 0{,}58$ oder 0,87 Kal. sein; sie ist nach obigen Zahlen 0,90; die Abweichung ist kleiner als die voraussichtlichen Beobachtungsfehler. Bei der Verbrennung von Rohrzucker (vgl. S. 1098) tritt keine Volumveränderung ein; in den meisten Fällen aber muß man an den mit Hilfe der Bombe bestimmten Verbrennungswärmen die Umrechnung von konstantem Volumen auf konstanten Druck vornehmen.

Ueberschätzung des ersten Hauptsatzes (Principe du travail maximum). Die Bildungswärme ist im allgemeinen um so größer, je leichter sich die Verbindung bildet, wie aus folgender Zusammenstellung der abgerundeten Oxydationswärmen einiger Elemente hervorgeht:

(2K,O)	= 97 Kal.	(2Ag,O)	= 6 Kal.	(2Al,3O)	= 380 Kal.
(2Na,O)	= 100 „	(2Hg,O)	= 22 „	(2Cr,3O)	= 268 „
(2Li,O)	= 140 „	(2Tl,O)	= 42 „	(2Fe,3O)	= 196 „
(Ca,O)	= 152 „	(Cu,O)	= 37 „		
(Mg,O)	= 144 „	(Zn,O)	= 85 „		
		(Mn,O)	= 91 „		
		(Ni,O)	= [illegible] „		
		(Pb,O)	= 50 „		

$H_2 + O = H_2O$ fl.	+ 68,4 Kal.
$Cl_2 + O = Cl_2O$ gas.	− 18 „
$N + O_2 = NO_2$ gas.	— 8 „
$2P + 5O = P_2O_5$ fest	+ 370 „
$2As + 5O = As_2O_5$ fest	+ 219 „
$C_{krist} + O_2 = CO_2$ gas.	+ 94 „
$Si_{krist.} + O_2 = SiO_2$ krist.	+ 191 „
$S_{rh.} + O_2 = SO_2$ gas.	+ 71 „
$Se_{am.} + O_2 = SeO_2$ fest	+ 57 „

Von den Metalloxyden sind diejenigen mit der kleinsten Bildungswärme wie Silber- und Quecksilberoxyd durch Erhitzen leicht aufzuspalten; Bleioxyd ist leichter zu reduzieren als Zink- oder Manganoxyd, entsprechend hat das Manganoxyd die größere Bildungswärme. Metallisches Aluminium ist schwerer aus dem Oxyd darzustellen als Eisen; seine Oxydationswärme ist rund doppelt so groß als die des Eisens.

Das explosive Chlormonoxyd bildet sich unter Wärmebindung, ebenso die leicht zersetzlichen Stickoxyde, während der äußerst schweren Reduzierbarkeit des Phosphorpentoxydes eine besonders große Bildungswärme entspricht usf. Zwischen chemischer Affinität und Bildungswärme besteht also allem Anschein nach ein Parallelismus.

Thomsen und namentlich Berthelot gingen aber weiter und stellten die Wärmetönung als direktes Maß für die Affinität, die treibende Kraft der Reaktion, hin. Berthelot schloß, daß jede chemische Umsetzung, die ohne Zwischentreten einer fremden Energie verläuft, diejenigen Stoffe entstehen läßt, bei deren Bildung die größte Wärmemenge entwickelt wird. Das ist falsch (vgl. bei gewöhnlicher Temperatur Verdampfung, Lösung usw.), und zwar um so falscher, je höher die Temperatur ist. Denn bei hohen Temperaturen dissoziieren die unter gewöhnlichen Bedingungen stabilen Verbindungen und bilden sich endotherme Körper wie die Stickoxyde und andere (nähere Diskussion siehe Abschnitt 2d, S. 1107).

Der erste Hauptsatz sagt nur aus, daß die Summe aus Wärmetönung und äußerer Arbeit (beide in denselben Einheiten gemessen) gleich der Abnahme der gesamten Energie des Systems U ist. Da die theoretischen Physiker die aufgenommene Wärmemenge mit + Q zu bezeichnen pflegen, lautet der erste Hauptsatz in der üblichen Diktion:

$$U = A - Q. \qquad 3)$$

Ueber das Eintreten eines Vorganges oder seine Richtung sagt der Satz von der Erhaltung der Energie nichts aus; das kann der zweite Hauptsatz leisten, den man den Satz von der beschränkten Umwandelbarkeit der Energie nennen kann.

2b) Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik.[1]) Aeußere Arbeit läßt sich erfahrungsgemäß vollständig in Wärme verwandeln, z. B. durch eine Bremsvorrichtung. Das Umgekehrte, die vollständige Verwandlung von Wärme in äußere Arbeit ist, ebenfalls erfahrungsgemäß, nicht möglich. Es gibt keine Vorrichtung, die der Umgebung Wärme entzieht und sie restlos als Arbeit nutzbar macht. Dem ersten Hauptsatz würde eine solche Maschine nicht zuwiderlaufen, man nennt sie darum ein Perpetuum mobile zweiter Art. Ein solches ist also ebenso eine Chimäre wie dasjenige erster Art. Man kann diese Tatsache auch in folgende Worte kleiden: Die Umwandlung von Wärme in Arbeit ist niemals die einzige Wirkung eines sich in der Natur abspielenden Prozesses. Denn wo eine (teilweise) Verwandlung von Wärme in Arbeit stattfindet, wie in jeder Dampfmaschine, ist solche Umwandlung mit einem irreversiblen Vorgang verknüpft. Damit ein Prozeß irreversibel ist, genügt es nicht, daß er sich nicht direkt umkehren läßt, sondern es ist erforderlich, daß es mit keinem Hilfsmittel möglich ist, nach Ablauf des Prozesses allenthalben den Anfangszustand wieder herzustellen.

Solche irreversible Vorgänge, die von selbst verlaufen und zu einem wirklichen Gleichgewicht führen, sind z. B. der Ausgleich von Druckdifferenzen in Gasen, von Temperatur-, Potential- und Konzentrationsgefällen, ferner vor allem unzählige chemische Prozesse. Jeder solche, von selbst, d. h. ohne Energiezufuhr verlaufende Vorgang kann eine gewisse Menge äußerer Arbeit leisten; sein Maximum an Arbeit leistet er, wenn er reversibel geleitet wird, was theoretisch immer möglich ist. Spielt sich der Vorgang isotherm ab, so ist die maximale Arbeit nur vom Anfangs- und Endzustand abhängig, nicht von dem Weg, auf dem der Endzustand erreicht wird. Besteht der Vorgang in einem Wärmetransport, bei dem die Wärmemenge Q von einem Körper von der Temperatur T + dT zu einem zweiten von der Temperatur T übertragen wird, so vermag der Vorgang, selbst bei bester, d. h. reversibler Leitung nur die äußere Arbeit $Q \cdot \frac{dT}{T}$ zu liefern, unabhängig von der Art der reversiblen Vorrichtung und der Natur des Systems. Die Formel lautet also:

$$dA = Q \cdot \frac{dT}{T} \qquad 4)$$

Durch Kombination mit dem ersten Hauptsatz erhält man:

$$Q = A - U = T \frac{dA}{dT} \qquad 5)$$

Der Ueberschuß der maximalen Arbeit eines sich isotherm abspielenden Prozesses über die gleichzeitige Abnahme der Gesamtenergie ist gleich dem Produkt aus der ab-

[1]) Es sei besonders auf die ausführliche Darstellung in Plancks Thermodynamik (3. Aufl. 1911) hingewiesen, ferner auf seinen zusammenfassenden Vortrag, Ber. chem. Ges. 45, 5 (1912).

soluten Temperatur und dem Temperaturkoeffizienten der maximalen Arbeit (Nernst).

Bei chemischen Vorgängen, die ohne Volumveränderung verlaufen, ist die Affinität der Stoffe zueinander durch die bei ihrer Vereinigung geleistete maximale Arbeit definiert. Spielt sich die Reaktion statt bei konstantem Volumen bei konstantem Druck ab, so kommt zu der Affinität noch die Ausdehnungsarbeit (pro Mol — RT) hinzu.

Nach Helmholtz nennt man A auch die Aenderung der freien (besser der frei verwandelbaren) Energie, A — U oder Q die Aenderung der gebundenen Energie oder die „latente Reaktionswärme". Da vollkommene Reversibilität nie zu erreichen ist, findet bei allen Vorgängen ein Uebergang von freier in gebundene Energie statt. Die Aenderung der freien Energie chemischer Prozesse ist nach Obigem unabhängig von dem Weg, auf dem sich der Umsatz vollzieht, und durch den Anfangs- und Endzustand des Systems eindeutig bestimmt.

Die Differenz zwischen dem (unbekannten) absoluten Betrag der Gesamtenergie und dem (ebenfalls unbekannten) absoluten Betrage der freien Energie dividiert durch die absolute Temperatur nennt Clausius die Entropie (vergl. S. 1105). Man kann den zweiten Hauptsatz also auch folgendermaßen formulieren:

Bei allen von selbst verlaufenden, d. h. irreversiblen Vorgängen nimmt die Entropie des sich verändernden Systems zu (Clausius-Planck).

Ein bestimmter Vorgang kann also eintreten, wenn durch ihn die Entropie des Systems wächst.

Den Ausdruck U — TS + pv nennt man das thermodynamische Potential. Bei jedem von selbst eintretenden Vorgang (Konstanz des Drucks und der Temperatur vorausgesetzt) nimmt das thermodynamische Potential ab. Existieren von einer Substanz mehrere Erscheinungsformen neben einander, so herrscht nur dann Gleichgewicht, wenn beide Aggregatzustände das gleiche thermodynamische Potential besitzen. — Mit welchem der genannten Ausdrücke man rechnet, ist in der Sache gleichgültig.

2c) Anwendungen des zweiten Hauptsatzes. In vielen einfachen Systemen wie Flüssigkeit-Dampf oder fester Körper-Schmelze oder fester Körper-Dampf bezw. seine gasförmige Dissoziationsprodukte ändern sich bei isotherm verlaufenden Reaktionen nur die Massen der Phasen, nicht ihre chemische Zusammensetzung; bei gegebenem Druck können die Phasen nur bei einer einzigen Temperatur miteinander existieren; bei anderen äußeren Bedingungen geht die Reaktion vollständig, bis zum Verbrauch einer Phase, vor sich, unter Absorption der Wärmemenge Q und der Volumänderung V_0. Für solche vollständige Gleichgewichte liefert der zweite Hauptsatz ohne weiteres die wichtige Formel:

$$Q = T \frac{dp}{dT} V_0 \qquad 6)$$

Q ist je nach der Art des Vorganges die Schmelzwärme, die Verdampfungs-, Sublimations-, Dissoziations-, Umwandlungswärme u. dgl.

Zahlenbeispiele: Es soll die Verdampfungswärme von Wasser bei 0° berechnet werden. Die Aenderung des Dampfdrucks ist für flüssiges Wasser in unmittelbarer Nähe von 0° +0,336 mm pro Grad; das spezifische Volumen des Wasserdampfes, gegen welches das vom flüssigen Wasser eingenommene ganz verschwindet, ist 206,5 Liter; also ist die Verdampfungswärme, nach Umrechnung von Literatmosphären in g-kal. =

$$\frac{273{,}1 \quad 206{,}5 \quad 0{,}336 \quad 24{,}18}{760} \quad 603 \text{ g-kal.}$$

Die besten direkten Bestimmungen lieferten 597 bis 607 g-kal. pro Gramm. Für 100° berechnet sich auf die gleiche Weise der Wert 538,9, der mit der letzten, sehr genauen Bestimmung von Richards und Mathews (J. Amer. chem. Soc. **33**, 863, 1911) absolut übereinstimmt.

Wie ändert sich der Schmelzpunkt des Eises mit der Temperatur? Beim Schmelzen nimmt das Volumen pro Gramm um 0.0000906 Liter ab, die Schmelzwärme ist 79,67 g-kal. pro Gramm. Also ist:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{273{,}1\,(-0{,}0000906)\,24{,}18}{79{,}67} \quad -0{,}0075^0,$$

während W. Thomson — 0,0073 und 0,0077° beobachtete. Für Metalle, die sich (bis auf das Wismut) beim Schmelzen ausdehnen, hat man die Gleichung in letzter Zeit bis zu 2000 Atmosphären verifizieren können; beim Wismut sinkt der Schmelzpunkt mit steigendem Druck, wie beim Eis; bei allen übrigen Metallen steigt er.

Entsprechend lassen sich Vorgänge wie Sublimation und Umwandlung behandeln. Handelt es sich um große Temperaturdifferenzen oder um Temperaturen, die von denen des kalorimetrischen Versuchs weit entfernt liegen, so muß die Veränderlichkeit von Q nach Formel (1) berücksichtigt werden.

Chemisch weit wichtiger und mannigfaltiger sind die sogenannten unvollständigen Gleichgewichte. Hier bewirkt eine kleine Temperaturänderung, bei konstant gehaltenem Druck, nur eine geringe Veränderung des Gleichgewichts, nicht das Verschwinden einer Phase. Das Gleichgewicht wird bei kon-

stant gehaltener Temperatur durch das Massenwirkungsgesetz regiert, d. h. durch die Konstante K charakterisiert (vgl. die Artikel „Chemisches Gleichgewicht“ und „Chemische Verwandtschaft“, wo alle Formeln ausführlich gegeben und zahlreiche Zahlenbeispiele angeführt sind).

Wird die Temperatur ohne Leistung äußerer Arbeit geändert, so gilt, da

$$A = RT \ln K$$

ist (vgl. die genannten Abschnitte), die Formel:

$$\frac{d \ln K}{d T} = \frac{U}{RT^2} \qquad (7)$$

Diese wichtige Gleichung nennt man die Reaktionsisochore, im Gegensatz zum Massenwirkungsgesetz, der Reaktionsisotherme. U bedeutet die bei der absoluten Temperatur T gemessene Wärmetönung (ohne Leistung äußerer Arbeit). Benutzt man die einfachste integrierte Form,

$$\ln K_2 - \ln K_1 = \frac{U}{R} \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_1 \cdot T_2} \qquad (8)$$

so dürfen die beiden Temperaturen, die man der Berechnung der Unbekannten zugrunde legt, nicht zu weit auseinander liegen, weil sich U mit der Temperatur mehr oder weniger ändert.

Zahlenbeispiele: Elektrolytische Dissoziationswärme des Wassers bei Zimmertemperatur.

Messungen nach ganz verschiedenen Methoden haben in guter Uebereinstimmung ergeben, daß das Produkt der Ionenkonzentrationen $[H^{\cdot}] [OH']$ bei 18° gleich $0{,}60 . 10^{-14}$ ist und bei 25° gleich $1{,}05 . 10^{-14}$. Da sich die Ionenprodukte eines so schwach dissoziierten Stoffes von den Massenwirkungskonstanten K nur um einen konstanten Faktor unterscheiden, kann man sie statt K_1 und K_2 in die Gleichung (8) einsetzen. Für U ergibt sich mit obigen Daten der Wert —13,8 Kal., d. h. genau die gleiche Zahl wie für die Neutralisationswärme starker Basen und Säuren in verdünnter Lösung (s. die Zusammenstellung S. 1098). Diese Identität wird von der Theorie der elektrolytischen Dissoziation gefordert (vgl. „Neutralisationswärme“ Abschnitt 5a S. 1115).

Analog berechnen sich die Dissoziationswärmen schwacher Basen und Säuren, für die das elektrische Leitvermögen die Dissoziationskonstanten K liefert (vgl. den Artikel „Elektrochemie“).

Lösungswärme des Silberchlorids aus der Löslichkeit bei zwei Temperaturen (c_1 und c_2). Da AgCl als binärer Elektrolyt in zwei Ionen zerfällt, ist K proportional c^2 und die Gleichung (8) nimmt die Form an:

$$\ln c_2 - \ln c_1 = \frac{U}{2R} \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_1 \cdot T_2}.$$

Nach den genausten Bestimmungen verdoppelt sich die Löslichkeit des AgCl zwischen 18° und 33,6°. Setzt man den Wert für ln 2 und die betreffenden Werte für die absoluten Temperaturen ein, so erhält man 15,75 Kal., während die Fällungswärme, vom Vorzeichen abgesehen, 15,87 ist (vgl. Zusammenstellung S. 1098).

Einen der wichtigsten Dienste leistet die Reaktionsisochore, wenn es sich darum handelt, die Dissoziationsgrade von Gasen, die man bei hohen Temperaturen bestimmt hat, zu kontrollieren. Denn die Daten von K müssen bei ihrer Kombination Werte von Q oder U ergeben, die unter sich und mit dem bei Zimmertemperatur gefundenen Wert nach Gleichung (1) zusammengehen. Je nach der Art, wie man die Gleichgewichte angibt, modifizieren sich die Formeln ein wenig. Rechnet man mit Konzentrationen, so gilt Gleichung (7) oder (8); rechnet man mit Partialdrucken, so muß man die Gleichgewichtskonstanten K_p und statt U die Wärmetönung bei konstantem Druck einsetzen. Ist die bei der Reaktion eintretende Aenderung der Anzahl Moleküle $\Sigma\nu$, so ist: $K_p = K(RT)^{-\Sigma\nu}$ und $Q_p = U + \Sigma\nu . RT$.

In vielen Fällen ist es am bequemsten, mit dem Dissoziationsgrad zu rechnen.

Als Beispiel möge die Reaktion des Schwefelsäurekontaktverfahrens ($2\ SO_3 = 2\ SO_2 + O_2$) dienen, welche von Bodenstein und Pohl (Zeitschr. f. Elch. **11**, 373; 1905) genau untersucht ist. Aus den gefundenen Massenwirkungskonstanten berechnen Bodenstein und Pohl nach Formel (7) folgende Wärmetönungen für ein Mol SO_3, wobei die zu benachbarten Temperaturen gehörigen K-Werte kombiniert wurden, so daß T die mittleren Temperaturen angibt, auf die sich Q bezieht.

T	Q
852°	21,9 Kal.
951°	21,7 „
1112°	21,5 „

Aus den Messungen von Berthelot und Thomsen bei Zimmertemperatur (T = etwa 290°) folgt im Mittel 21,6 Kal. Die Uebereinstimmung ist frappant; für dieses System war, nach dem präsumptiven Gang der in Frage kommenden spezifischen Wärmen, zu erwarten, daß die Temperaturänderung von Q ausnahmeweise klein sein würde..

Vielfach liefert die Reaktionsisochore Wärmetönungen, für die eine direkte Messung unter allen Umständen ausgeschlossen ist, z. B. die bei der Dissoziation von komplexen und einfachen Molekülen auftretenden Wärmemengen: z. B. $(H_2O)_{2\,fl} = 2\ H_2O_{fl}$ oder

$S_6 = 3\,S_2$: $J_2 = 2\,J$ usf. In einigen Fällen ergab sich aus den nach der Reaktionsisochore abgeleiteten Wärmetönungen, daß der bei Zimmertemperatur direkt oder auf Umwegen nach dem Satz von der Konstanz der Wärmesummen bestimmte Wert fehlerhaft war! (vgl. „Bildungswärme von Schwefelkohlenstoff“ S. 1125).

Will man sich klar machen, wie, zunächst rein qualitativ, eine Veränderung der äußeren Bedingungen auf ein Gleichgewicht wirkt, d. h. nach welcher Richtung die Reaktion geht, so ist die sinnfälligste Fassung des zweiten Hauptsatzes diejenige von Le Chatelier und Braun, die man das Prinzip des kleinsten Zwanges nennt und folgendermaßen formulieren kann: Aendert man in einem im Gleichgewicht befindlichen System einen Gleichgewichtsfaktor, so ändern sich die anderen Faktoren in dem Sinne, daß der äußere Zwang teilweis kompensiert wird. Also:

1. Ist eine Reaktion mit Wärmeentwickelung verbunden, so geht bei Temperatursteigerung die entgegengesetzte Reaktion vor sich und umgekehrt. Da bei der Absorption von Gasen Wärme entwickelt wird, sinkt der Absorptionskoeffizient mit steigender Temperatur; da bei der Auflösung der meisten Salze Wärme gebunden wird, steigt die Löslichkeit mit steigender Temperatur; tritt, was sehr selten ist, beim Lösen Wärmeentwickelung ein (z. B. beim wasserfreien Na_2SO_4 oberhalb 33°), so sinkt die Löslichkeit mit steigender Temperatur. Ist die Lösungswärme groß, wie z. B. bei den meisten schwerlöslichen Salzen oder bei KNO_3, so haben die Substanzen einen großen Temperaturkoeffizienten der Löslichkeit; ist die Lösungswärme klein, wie z. B. beim Kochsalz, so ändert sich die Löslichkeit wenig mit der Temperatur. — Alle Dampfdrucke steigen mit der Temperatur an, da beim Verdampfen und Sublimieren Wärme gebunden wird.

Bei hohen Temperaturen treten endotherme Reaktionen ein: Dissoziation stabiler Verbindungen wie HCl, H_2O, SO_3 und Bildung labiler wie der Stickoxyde.

2. Bei Drucksteigerung geht die Reaktion in der Richtung vor sich, daß sich das Volumen des Systems verkleinert, vgl. Abhängigkeit des Schmelzpunktes vom Druck S. 1102. Nehmen die Ionen in der Lösung ein kleineres Volumen ein als das nichtdissoziierte Molekül, so steigt die Dissoziationskonstante mit steigendem Druck an. Bei Gasen ist die Dissoziation vom Druck unabhängig, wenn sie ohne Volumveränderung verläuft (z. B. beim HJ), meist wird die Dissoziation mit abnehmendem Druck zunehmen. Die Löslichkeit steigt mit dem Druck, wenn beim Lösen, wie meist der Fall ist, eine Kontraktion eintritt.

Diese Beispiele ließen sich beliebig vermehren.

2d) Das Nernstsche Wärmetheorem. Während der zweite Hauptsatz nur über die Aenderung der Gleichgewichte bezw. der maximalen Arbeit oder der Affinität mit der Temperatur etwas aussagt, gibt das Nernstsche Wärmetheorem Mittel an die Hand, die Affinitäten oder die Gleichgewichte selbst aus thermischen Daten abzuleiten.

Den Kern des Theorems bildet die Anschauung, daß in kondensierten Systemen (d. h. solchen, die nur aus flüssigen und festen Stoffen bestehen) die maximale Arbeit und die Wärmetönung nicht erst beim absoluten Nullpunkt selbst einander gleich werden, wie die beiden thermodynamischen Hauptsätze lehren, sondern daß sich die Kurven für A und für U im absoluten Nullpunkt asymptotisch berühren; mathematisch gesprochen, daß

$$\lim \frac{dA}{dT} \text{ und } \lim \frac{dU}{dT} \text{ für } T = 0$$

einander gleich werden. In kondensierten Systemen unterscheiden sich also A und U bei tiefen Temperaturen nur wenig voneinander, d. h. das Berthelotsche Prinzip der größten Arbeit gilt für die Umsetzungen fester Stoffe schon in der Nähe des absoluten Nullpunkts angenähert.

Da man die spezifischen Wärmen als Temperaturfunktionen nach ganzen Potenzen von T darstellen kann, muß das auch für die Wärmeentwickelung eines Prozesses der Fall sein, da ja $\frac{dU}{dT}$ gleich der Differenz der spezifischen Wärmen vor und nach der Reaktion ist (vgl. Formel 1). Man kann also schreiben: $U = U_0 + \alpha T + \beta T^3 + \gamma T^2$, wo die aus dem Temperaturgang von spezifischen Wärmen zu berechnenden Größen β und γ erfahrungsgemäß nicht groß sind.

Durch Kombination mit Formel (5) und weitere mathematische Behandlung[1]) folgt, daß $\alpha = 0$ ist, daß ferner gilt:

$$A = U_0 - \beta T^2 - \frac{\gamma}{2} T^3 \qquad 9)$$

Also läßt sich A aus lauter thermischen Größen darstellen! Schließlich muß für T = 0

[1]) Ausführlicheres findet man im Nernstschen Lehrbuch der Theoretischen Chemie (7. Aufl. 1913); ferner in den Monographien von Sackur (Thermochemie und Thermodynamik, Berlin 1912) und namentlich von Pollitzer (Die Berechnung chemischer Affinitäten nach dem Nernstschen Wärmetheorem, Stuttgart 1912).

$$\lim \frac{dA}{dT} = 0 \text{ und } \lim \frac{dU}{dT} = 0 \qquad 10)$$

werden.

Ist $\lim \frac{dU}{dT} = 0$, so dürfen sich die spezifischen Wärmen bei ganz tiefen Temperaturen durch Reaktionen nicht ändern, d. h. sie müssen rein additiv sein; das ist der Fall, denn sie werden allmählich alle gleich Null. In vielen Fällen kann man in der Gleichung, die U als Temperaturfunktion darstellt, das Glied mit γ schon vernachlässigen, so daß $U = U_0 + \beta T^2$ und $A = U_0 - \beta T^2$ wird. Alsdann wird der Temperaturverlauf von A und U, wie er in der Fig. 1 dargestellt ist.

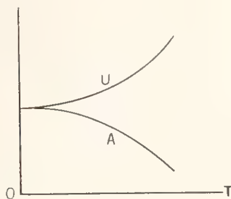


Fig. 1.

Man kann den Nernstschen Satz auch in folgende Form bringen: Es ist unmöglich, durch irgendwelche stoffliche Veränderungen von einer selbst beliebig tiefen Temperatur bis zum absoluten Nullpunkt zu gelangen.

Nernstsches Theorem und Entropiebegriff. In dem Wert für die Entropie (vgl. Abschnitt 2b S. 1102) bleibt nach den beiden Hauptsätzen stets noch eine Konstante unbestimmt, da man nur Entropiedifferenzen mißt (wie ja auch bei der Energie). Nach dem neuen Wärmetheorem wird die additive Konstante nun ganz allgemein festgelegt: die Entropie eines festen oder flüssigen, chemisch einheitlichen Stoffs hat beim Nullpunkt der absoluten Temperatur den Wert Null (Planck).

Nimmt man an, daß alle stofflichen Eigenschaften, die mit sinkender Temperatur einem endlichen Grenzwert zustreben, dies asymptotisch tun, so gelangt man sofort zum Nernstschen Theorem.

Auch von der Quantentheorie führen direkte Wege zu dem Satz von Nernst. (Vgl. z. B. den zusammenfassenden Vortrag von Planck, Ber. chem. Ges. 45, 5; 1912). Doch kann auf die Theorie und den sie stützenden, überraschenden Verlauf der spezifischen Wärmen bei extrem tiefen Temperaturen hier nicht eingegangen werden.

Anwendungen des Nernstschen Wärmetheorems. 1. Kondensierte Systeme. Umwandlungspunkt. A ist klein gegen U und wird im Umwandlungspunkt gleich Null. Man kann den Umwandlungspunkt also aus der Gleichung: $A = U_0 - \beta T^2$ berechnen, wenn die spezifische Wärmen der beiden Modifikationen in ihrer Temperaturabhängigkeit bekannt sind. Das ist z. B. für rhombischen und monoklinen Schwefel der Fall. Es gelten die Gleichungen: $c_2 - c_1 = 2{,}30 \cdot 10^{-5}T$, $U = 1{,}57 + 1{,}15 \cdot 10^{-5}T^2$. Aus der Gleichung $A = 1{,}57 - 1{,}15 \cdot 10^{-5}T^2$ berechnet sich die Umwandlungstemperatur zu $T_0 = 369{,}5^0$, während $368{,}4^0$ ($95{,}4^0$ C) beobachtet ist!

2. Anwendung auf Systeme mit gasförmigen Phasen. Die Gleichgewichtsverhältnisse in der Gasphase lassen sich auf die der festen und flüssigen Phase, für welche das Theorem gilt, zurückführen, wenn man den Dampfdruck der betreffenden Stoffe kennt. Die Dampfdruckkurve läßt sich aber bis auf eine Integrationskonstante, die sogenannte chemische Konstante, mit Hilfe rein thermischer Größen darstellen. Kennt man also einen Punkt der Dampfdruckkurve, so lassen sich auch die Affinitäten von Gasreaktionen bei allen Temperaturen berechnen.

Diese chemischen Konstanten ($\mathfrak{C}$) sind von der Natur des Kondensates (Modifikation, Aggregatzustand) unabhängig und stellen für jedes Gas eine spezifische Konstante dar. Es folgen einige chemische Konstanten, meist aus Dampfdrucken (in Atmosphären gemessen) abgeleitet, zum Teil mit Hilfe der revidierten Troutonschen Regel.

H_2	1,6	N_2	2,6	O_2	2,8	Cl_2	3,1	Br_2	3,2	J_2	3,9	HCl	3,0	HBr	3,2
HJ	3,4	CO	3,5	NO	3,5	H_2O	3,6	H_2S	3,0	SO_2	3,3	CO_2	3,2	CS_2	3,1
N_2O	3,3	NH_3	3,3	CH_4	2,8	$CHCl_3$	3,2	C_6H_6	3,0	$(CN)_2$	3,4	C_2H_2	3,2	C_2H_6	2,6
C_2H_5OH	4,1														

Für die Orientierung über die angenäherte Lage eines chemischen Gleichgewichts genügt meist folgende Näherungsformel, in der die Gleichgewichtskonstante K′ in Partialdrucken ausgedrückt ist, Q′ die Wärmetönung bei konstantem Druck und gewöhnlicher Temperatur nach thermodynamischer Zählweise, $\Sigma\nu$ die Differenz der bei der Reaktion verschwindenden und sich bildenden Gasmoleküle, $\mathfrak{C}$ die chemischen Konstanten dieser Gase bedeuten

$$\log K' = \frac{Q'}{4{,}571\ T} + \Sigma\nu \cdot 1{,}75 \log T + \Sigma\nu\mathfrak{C} \qquad 11)$$

Anwendungen. Thermische Dissoziation nach dem Schema $AB \rightleftarrows A + B$. $\Sigma\nu$ ist hier gleich 1; setzt man in erster Annäherung die chemischen Konstanten $\mathfrak{C}$ allgemein gleich 3, so bleibt nur Q individuell. Man kann also berechnen, bei welchen Temperaturen die Dissoziationen, denen Wärmetönungen von verschiedener Größe entsprechen, einen gewissen Grad erreichen, z. B. zur Hälfte vor sich gegangen sind (T_1).

Dissoziation zur Hälfte

für $-Q =$	bei $T_1 =$	für $-Q =$	bei $T_1 =$
10000	281°	50000	1231°
20000	531°	100000	2335°
30000	770°	150000	3400°

Für N_2O_4 ist $-Q$ etwa 12500g-kal.; dementsprechend ist die Dissoziation schon bei Zimmertemperatur sehr beträchtlich. T_1 berechnet sich zu 340°, während man aus direkten Dissoziationsbestimmungen 323° interpoliert. Für die Dissoziation von PCl_5 ist $Q = -18{,}5$ Kal., woraus sich T_1 zu 500° berechnet, während 480° beobachtet ist. Die Dissoziation von Ameisen- und Essigsäuredampf (Zerfall der Doppelmolekeln) liegt nach Q und T_1 zwischen den genannten Fällen. Für die wohl allgemein angenommene Molekeln Cl_4 ist Q etwa -2 Kal. Diese komplexen Molekeln können also nur in der Nähe des Siedepunkts in erheblicher Menge existieren; für J_2 ist $Q = -36{,}9$ Kal. (bei 1000°), für Br_2 $-55{,}3$, für Cl_2 dürfte Q etwa den Wert -110 bis -120 Kal. besitzen, während sich für die selbst bei den höchsten Temperaturen keine Spur von Dissoziation zeigenden Gase wie N_2, O_2, H_2 phantastisch hohe Dissoziationswärmen berechnen.

Für das Gleichgewicht $CaCO_3 \rightleftarrows CaO + CO_2$ ist $Q = -42{,}4$ Kal., $\Sigma\nu = +1$, die chemische Konstante des CO_2 3,2. Nach Einsetzung dieser Werte in die Näherungsgleichung ergibt sich z. B., daß der Dissoziationsdruck bei 700° C 58 mm sein soll, während 50mm beobachtet sind. Die (abs.) Temperatur, bei der der Gleichgewichtsdruck eine Atmosphäre beträgt, berechnet sich zu 1090°, während die beobachteten Werte zwischen 1100 und 1180° liegen. — In einigen Fällen führte das Theorem, wenn man den in der Literatur angegebenen Wert von Q einsetzte, zu Konsequenzen, den Dampfdruck oder die Zersetzlichkeit betreffend, die mit der Erfahrung in Widerspruch standen. Eine Nachprüfung ergab, daß die alten Q-Werte falsch waren (z. B. die Bildungswärmen von AgJ oder den Kupfersulfiden); eine sorgfältige Neubestimmung lieferte Werte, die zu richtigen Konsequenzen führten.

Diese und weitere Beispiele für die Näherungsformel und die kompliziertere genaue Gleichung, welche vorzügliche Ergebnisse liefert, weil sie den Temperaturgang der spezifischen Wärmen berücksichtigt, findet man z. B. in der Monographie von Pollitzer.

Das Berthelotsche Prinzip der größten Arbeit und das Nernstsche Wärmetheorem. S. 1100 ist gezeigt worden, daß Berthelots Prinzip der größten Arbeit bei tieferen Temperaturen häufig angenähert gilt. Aus der Näherungsformel (11) kann man ableiten, unter welchen Bedingungen man von dem Berthelotschen Satz Gebrauch machen darf. Die Affinität der Reaktion ist

$$A = RT \log K' = Q' - RT\,\Sigma\nu \,.\, 1{,}75 \,.\, \log T - RT\,\Sigma\nu\mathfrak{C}.$$

Damit $A = Q$ wird, müssen die beiden letzten Glieder, die beide das gleiche Vorzeichen haben, verschwinden. Das geschieht

1. bei tiefen Temperaturen, in der Nähe des absoluten Nullpunkts,

2. wenn Q groß ist, annähernd auch bei Zimmertemperatur,

3. in kondensierten Systemen, da sich ja $\Sigma\nu$ nur auf Gase bezieht,

4. auch bei Gasreaktionen, welche ohne Aenderung der Molekülzahl verlaufen, da die chemischen Konstanten meist gleich sind (ca. 3).

Dagegen gilt das Berthelotsche Prinzip nicht, wenn Q klein ist, oder wenn sich die Molekülzahl ändert. (Beispiele: Zerfall von HJ und N_2O_4).

Entsteht eine Verbindung unter Wärmeabsorption (NO oder C_2H_2), so ist sie erst bei sehr hohen Temperaturen und nur mit einem kleinen Partialdruck existenzfähig.

3. **Spezielle anorganische Thermochemie.** Durch die Messungen von Berthelot und namentlich Thomsen, sowie Berthelots Mitarbeiter sind wir über die Wärmetönungen der meisten anorganischen Umsetzungen gut unterrichtet; in wenigen Fällen (z. B. bei der Thermochemie des Quecksilbers) bedurften Thomsens Messungen einer erheblichen Korrektur. Ferner sind einige Elemente und Verbindungen erst in neuerer Zeit durch die modernen präparativen Hilfsmittel (wie den elektrischen Ofen, das Thermitverfahren oder die Oxydation mit

[1] Die Annäherungsformel setzt voraus, daß die mit der Reaktion verbundene Aenderung der Wärmekapazität des Systems ($\Sigma\nu C_p$) bei allen Temperaturen dieselbe ist. 4,571 ist R dividiert durch den Modul der Briggsschen Logarithmen; die Differenz der Molekularwärmen von Gas und Kondensat beim absoluten Nullpunkt ist provisorisch gleich 3,5 = 2.1,75 angenommen.

Na_2O_2) rein oder fast rein dargestellt worden, so daß die alten Werte verbessert oder neue Elemente in den Kreis der Untersuchung gezogen werden konnten.

Die wenigsten unten aufgeführten Wärmetönungen sind direkt gemessen worden, vielmehr hat jeder Thermochemiker von der indirekten Messung durch Kombination nach dem Gesetz von der Konstanz der Wärmesummen den weitestgehenden Gebrauch gemacht.

Ist z. B. die Lösungswärme eines Metalls in einer Säure von bekannter Bildungswärme genau bestimmt, so lassen sich durch Umsetzungen mit anderen Säuren oder Salzen die Bildungswärmen der dabei entstehenden Verbindungen berechnen. Nur addieren sich dabei alle Fehler.

Kombiniert man die von verschiedenen Forschern angegebenen Zahlen, so resultieren daher oft Werte, die um mehrere Prozent auseinander liegen. Daher sind z. B. alle Daten für Fluorverbindungen mit einer ziemlich großen Unsicherheit behaftet.

Im folgenden sind die wichtigsten Wärmetönungen aufgeführt.

Die Atomsymbole bedeuten natürlich nicht, daß die Elemente im atomaren Zustand vorhanden waren. Die Substanzen befinden sich in dem bei Zimmertemperatur stabilen Zustand: Cl = Gas, Br = fl., J = fest. Die Bildungswärmen wichtiger organischer Körper aus ihren Elementen, die nur aus Verbrennungen abzuleiten sind, findet man im letzten Abschnitt. Die wichtigsten Wärmetönungen der meisten Elemente sind auch bei den einzelnen Elementen, speziell den Metallen aufgeführt, so daß die Bildungswärmen der Metallverbindungen hier nur sehr kurz behandelt worden sind. Eine eingehende Diskussion der bis 1892 gemessenen Daten verdankt man Ostwald (Lehrbuch, 2. Aufl.).

3a) Bildungswärmen einiger Verbindungen von Nichtmetallen in Kilogramm-Kalorien. Positives Vorzeichen bedeutet Wärmeentwickelung. Die Lösungswärme bezieht sich auf die Bildung sehr verdünnter Lösungen.

1. Wasserstoffverbindungen. (Bis auf die des Wasserstoffs sauerstofffrei.)

H + F = HF + ca. 38,5 Kal. Lösungswärme + 11,8.
H + Cl = HCl + 22,00. Direkte Messung. Lösungswärme + 17,3.
H + Br = HBr + 8,45; für gasf. Br 3,5 Kal. mehr. Lösungswärme + 19,9.
H + J = HJ — 6,15; für gasf. J 5,5 Kal. mehr. Lösungswärme + 19,2.

Interessant ist der Abfall der Wärmetönung mit steigendem Atomgewicht des Halogens. Steigende Neigung zur Dissoziation!

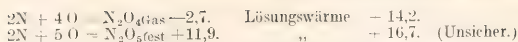
2H + O = $H_2O_{fl.}$ + 68,44. Nach der Zusammenstellung von Mixter (Am. Journ. Sc. **16**, 228; 1903). Direkte Bestimmung, bei Zimmertemperatur und konstantem Druck, auf H = 1,008 bezogen.
2H + 2 O + aq. = H_2O_2, aq. + 45,3. Lösungswärme des fl. H_2O_2 + 0,46.
2H + $S_{rh.}$ = H_2S + 2,75. (Unsicher; aus der Reaktionsisochore folgt + 5,0). Für S-Dampf 20 bis 29 Kal. mehr, je nach Temperatur. Lösungswärme + 4,56.
2H + $Se_{krist.}$ = H_2Se — 25. (Unsicher; aus Reaktionsisochore folgt — 17,5). Lösungswärme + 9,3.
2H + $Te_{krist.}$ = H_2Te — 35.

Wieder ist der Zusammenhang zwischen Atomgewicht, Wärmetönung und Stabilität deutlich! Ebenso bei der nächsten Gruppe.

3H + N = NH_3 + 12,0. Lösungswärme + 8,4. Verbrennungswärme bei konstantem Druck + 90,65.
4H + 2N + aq. = N_2H_4, aq. — 9,5. Lösungswärme des Hydrats $N_2H_5.OH$ + 1,9.
3H + N + aq. = N_3H, aq. —62. Wie das Ammonsalz N_4H_4 stark endotherm, explosiv.
3H + $P_{weiß}$ = PH_{3Gas} + 5,8. Unsicher.
3H + $As_{krist.}$ = AsH_{3Gas} —44 Kal. Unsicher.
3H + $Sb_{met.}$ = SbH_{3Gas} —34 Kal. Direkter Zerfall.
4H + $C_{Graph.}$ = CH_4 + 19,2 Kal.
2H + $2C_{Graph.}$ = C_2H_{2Gas} —53,9 Kal. Direkter Zerfall. Die Verbrennungswärme ergab einen etwas anderen, unsichereren Wert.
4H + $Si_{am.}$ = SiH_{4Gas} + 7,5 Kal.

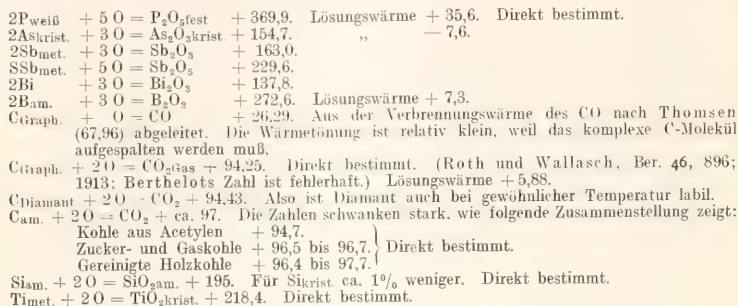
2. Oxyde. (Ohne Wasserstoff.)

$2 O_3 = 3 O_2$ + 68,2 Kal. Direkter Zerfall.
2Cl + O = Cl_2O_{Gas} —17,9 Kal. Lösungswärme + 9,4.
2J + 5 O = J_2O_{5fest} + 45,1 Kal. Lösungswärme —1,8.
$S_{rh.}$ + 2 O = SO_{2Gas} + 71,1. Direkt bestimmt. Lösungswärme + 7,7.
$S_{rh.}$ + 3 O = $SO_{3fl.}$ + 103,3 Kal. Lösungswärme + 39,2.
$Se_{am.}$ + 2 O = SeO_{2fest} + 57,1. (Unsicher; andere Angabe +63,5). Lösungswärme —0,9.
$Te_{krist.}$ + 2 O = $TeO_{2krist.}$ + 87,1. Bildungswärme von TeO_3 nicht größer.
2N + O = N_2O_{Gas} —17,7 Kal. Lösungswärme + 4,5.
N + O = NO_{Gas} —21,6.
2N + 3 O = N_2O_{3Gas} —21,4. „ + 14,6.
N + 2 O = NO_{2Gas} —8,1.



$2N + 4\,O = N_2O_{4\,\text{Gas}}$ — 2,7. Lösungswärme — 14,2.
$2N + 5\,O = N_2O_{5\,\text{fest}}$ + 11,9. „ + 16,7. (Unsicher.)

Sicherer und wichtiger ist die Bildung von verdünnter Salpetersäurelösung aus N, O und aq. Da NO, das sich primär bildende Oxyd, stark endotherm ist, kann es sich nur bei hohen Temperaturen bilden und neben den Komponenten in merklicher Menge bestehen. Es bildet sich also partiell, sobald in einem Luftraum oder überhaupt in einem N_2 und O_2 enthaltenden Gas lokal eine hohe Temperatur erzeugt wird (elektrische Entladungen, Explosionen), also z. B. bei jeder Verbrennung in der kalorimetrischen Bombe. Da die Zersetzungsgeschwindigkeit des NO bei hohen Temperaturen groß ist, muß man bei der Darstellung für rasche Abkühlung sorgen.

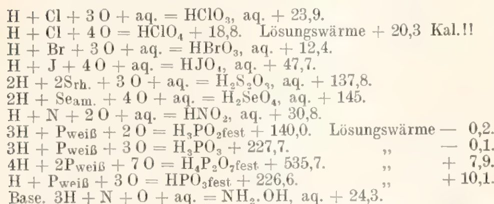


$2P_{\text{weiß}} + 5\,O = P_2O_{5\,\text{fest}}$ + 369,9. Lösungswärme + 35,6. Direkt bestimmt.
$2As_{\text{krist.}} + 3\,O = As_2O_{3\,\text{krist.}}$ + 154,7. „ — 7,6.
$2Sb_{\text{met.}} + 3\,O = Sb_2O_3$ + 163,0.
$SSb_{\text{met.}} + 5\,O = Sb_2O_5$ + 229,6.
$2Bi + 3\,O = Bi_2O_3$ + 137,8.
$2B_{\text{am.}} + 3\,O = B_2O_3$ + 272,6. Lösungswärme + 7,3.
$C_{\text{Graph.}} + O = CO$ + 26,29. Aus der Verbrennungswärme des CO nach Thomsen (67,96) abgeleitet. Die Wärmetönung ist relativ klein, weil das komplexe C-Molekül aufgespalten werden muß.
$C_{\text{Graph.}} + 2\,O = CO_{2\,\text{Gas}}$ + 94,25. Direkt bestimmt. (Roth und Wallasch, Ber. **46**, 896; 1913; Berthelots Zahl ist fehlerhaft.) Lösungswärme + 5,88.
$C_{\text{Diamant}} + 2\,O = CO_2$ + 94,43. Also ist Diamant auch bei gewöhnlicher Temperatur labil.
$C_{\text{am.}} + 2\,O = CO_2$ + ca. 97. Die Zahlen schwanken stark, wie folgende Zusammenstellung zeigt:

Kohle aus Acetylen	+ 94,7.	Direkt bestimmt.
Zucker- und Gaskohle	+ 96,5 bis 96,7.	
Gereinigte Holzkohle	+ 96,4 bis 97,7.	

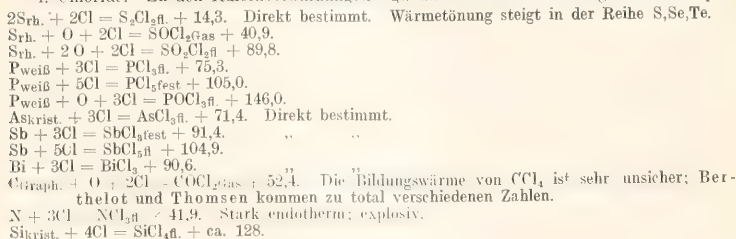
$Si_{\text{am.}} + 2\,O = SiO_{2\,\text{am.}}$ + 195. Für $Si_{\text{krist.}}$ ca. 1% weniger. Direkt bestimmt.
$Ti_{\text{met.}} + 2\,O = TiO_{2\,\text{krist.}}$ + 218,4. Direkt bestimmt.

3. Säuren, soweit die Bildungswärmen nicht aus 2. zu berechnen sind.



$H + Cl + 3\,O + aq. = HClO_3, aq.$ + 23,9.
$H + Cl + 4\,O = HClO_4$ + 18,8. Lösungswärme + 20,3 Kal.!!
$H + Br + 3\,O + aq. = HBrO_3, aq.$ + 12,4.
$H + J + 4\,O + aq. = HJO_4, aq.$ + 47,7.
$2H + 2S_{\text{rh.}} + 3\,O + aq. = H_2S_2O_3, aq.$ + 137,8.
$2H + Se_{\text{am.}} + 4\,O + aq. = H_2SeO_4, aq.$ + 145.
$H + N + 2\,O + aq. = HNO_2, aq.$ + 30,8.
$3H + P_{\text{weiß}} + 2\,O = H_3PO_{2\,\text{fest}}$ + 140,0. Lösungswärme — 0,2.
$3H + P_{\text{weiß}} + 3\,O = H_3PO_3$ + 227,7. „ — 0,1.
$4H + 2P_{\text{weiß}} + 7\,O = H_4P_2O_{7\,\text{fest}}$ + 535,7. „ + 7,9.
$H + P_{\text{weiß}} + 3\,O = HPO_{3\,\text{fest}}$ + 226,6. „ + 10,1.
Base. $3H + N + O + aq. = NH_2.OH, aq.$ + 24,3.

4. Chloride. Zu den Haloidverbindungen vgl. auch Abschnitt 7: Organische Körper.



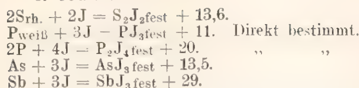
$2S_{\text{rh.}} + 2Cl = S_2Cl_{2\,\text{fl.}}$ + 14,3. Direkt bestimmt. Wärmetönung steigt in der Reihe S, Se, Te.
$S_{\text{rh.}} + O + 2Cl = SOCl_{2\,\text{Gas}}$ + 40,9.
$S_{\text{rh.}} + 2\,O + 2Cl = SO_2Cl_{2\,\text{fl}}$ + 89,8.
$P_{\text{weiß}} + 3Cl = PCl_{3\,\text{fl.}}$ + 75,3.
$P_{\text{weiß}} + 5Cl = PCl_{5\,\text{fest}}$ + 105,0.
$P_{\text{weiß}} + O + 3Cl = POCl_{3\,\text{fl.}}$ + 146,0.
$As_{\text{krist.}} + 3Cl = AsCl_{3\,\text{fl.}}$ + 71,4. Direkt bestimmt.
$Sb + 3Cl = SbCl_{3\,\text{fest}}$ + 91,4. „ „
$Sb + 5Cl = SbCl_{5\,\text{fl}}$ + 104,9.
$Bi + 3Cl = BiCl_3$ + 90,6. „ „
$C_{\text{Graph.}} + O + 2Cl = COCl_{2\,\text{Gas}}$ + 52,4. Die Bildungswärme von CCl_4 ist sehr unsicher; Berthelot und Thomsen kommen zu total verschiedenen Zahlen.
$N + 3Cl = NCl_{3\,\text{fl}}$ — 41,9. Stark endotherm; explosiv.
$Si_{\text{krist.}} + 4Cl = SiCl_{4\,\text{fl.}}$ + ca. 128.

5. Bromide.



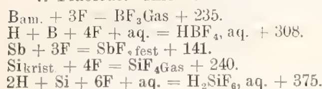
$2S_{\text{rh.}} + 2Br = S_2Br_{2\,\text{fl.}}$ + 2,0.
$P_{\text{weiß}} + 3Br = PBr_{3\,\text{fl.}}$ + 45.
$P_{\text{weiß}} + 5Br = PBr_{5\,\text{fest}}$ + 59. PBr_5 dissoziiert wegen seiner kleineren Bildungswärme noch leichter als PCl_5.
$P + O + 3Br = POBr_{5\,\text{fest}}$ + 106.
$As_{\text{krist.}} + 3Br = AsBr_{3\,\text{fest}}$ + 45,5.
$Sb + 3Br = SbBr_{3\,\text{fest}}$ + 61,4.
$B_{\text{am.}} + 3Br = BBr_{5\,\text{fl.}}$ + 43,2.

6. Jodide.



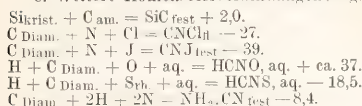
$2S_{rh.} + 2J = S_2J_{2\,fest} + 13,6.$
$P_{weiß} + 3J = PJ_{3\,fest} + 11.$ Direkt bestimmt.
$2P + 4J = P_2J_{4\,fest} + 20.$,, ,,
$As + 3J = AsJ_{3\,fest} + 13,5.$
$Sb + 3J = SbJ_{3\,fest} + 29.$

7. Fluoride. Alle Zahlen können nur als Näherungswerte betrachtet werden.



$B_{am.} + 3F = BF_3Gas + 235.$
$H + B + 4F + aq. = HBF_4, aq. + 308.$
$Sb + 3F = SbF_{3\,fest} + 141.$
$Si_{krist.} + 4F = SiF_{4\,Gas} + 240.$
$2H + Si + 6F + aq. = H_2SiF_6, aq. + 375.$

8. Weitere Kohlenstoffverbindungen: vgl. auch letzten Abschnitt 7: Organ. Thermoch.



$Si_{krist.} + C_{am.} = SiC_{fest} + 2,0.$
$C_{Diam.} + N + Cl = CNCl_{fl} - 27.$
$C_{Diam.} + N + J = CNJ_{fest} - 39.$
$H + C_{Diam.} + O + aq. = HCNO, aq. + ca. 37.$
$H + C_{Diam.} + S_{rh.} + aq. = HCNS, aq. - 18,5.$
$C_{Diam.} + 2H + 2N = NH_2.CN_{fest} - 8,4.$

Andere Wärmetönungen lassen sich meist durch Kombination der angegebenen Daten finden, nach dem Gesetz von den konstanten Wärmesummen; vgl. S. 1099 Abschnitt 2a.

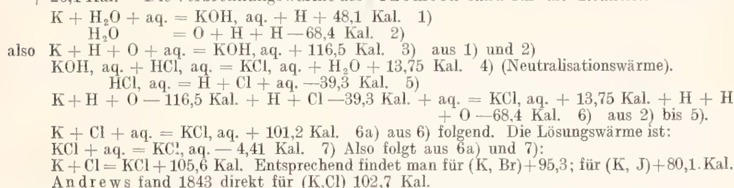
Beispiele. Zersetzung des gelösten H_2O_2 in Wasser und Sauerstoff. Bildungswärme des Wassers + 68,44 Kal., die des Peroxyds in Lösung + 45,3 Kal. Also Zersetzungswärme des Peroxyds 68,4 — 45,3 = 23,1 Kal. — Die Bildung von Phosgen aus Kohlenoxyd und Chlor ist mit einer Wärmeentwickelung verbunden, welche gleich der Differenz der Bildungswärmen des Phosgens aus den Elementen und des Kohlenoxyds aus den Elementen sein muß, also + 52,4 — 26,3 = + 26,1 Kal. — Die Verbrennungswärme des SO_2 ist aus der Tabelle als Differenz der Bildungswärmen von SO_3 und SO_2 zu finden usw.

3b) Bildungswärmen einiger Metallverbindungen. Falls nichts Besonderes bemerkt ist, beziehen sich die ersten Angaben auf die wasserfreien Verbindungen, die Lösungswärmen auf die Bildung ganz verdünnter Lösungen aus anhydrischem Salz und Wasser.

1. Lithiumgruppe.

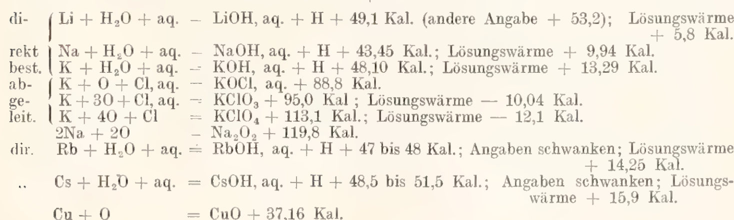
Am Kalium möge gezeigt werden, wie man Wärmetönungen, die schlecht direkt zu messen sind, aus anderen Daten ableitet.

Gesucht sei die Bildungswärme des festen KCl beim Entstehen aus den Elementen. Thomsen fand für die Reaktionen:



$K + H_2O + aq. = KOH, aq. + H + 48,1$ Kal. 1)
$H_2O = O + H + H - 68,4$ Kal. 2)
also $K + H + O + aq. = KOH, aq. + 116,5$ Kal. 3) aus 1) und 2)
$KOH, aq. + HCl, aq. = KCl, aq. + H_2O + 13,75$ Kal. 4) (Neutralisationswärme).
$HCl, aq. = H + Cl + aq. - 39,3$ Kal. 5)
$K + H + O - 116,5$ Kal. $+ H + Cl - 39,3$ Kal. $+ aq. = KCl, aq. + 13,75$ Kal. $+ H + H + O - 68,4$ Kal. 6) aus 2) bis 5).
$K + Cl + aq. = KCl, aq. + 101,2$ Kal. 6a) aus 6) folgend. Die Lösungswärme ist:
$KCl + aq. = KCl, aq. - 4,41$ Kal. 7) Also folgt aus 6a) und 7):
$K + Cl = KCl + 105,6$ Kal. Entsprechend findet man für (K, Br) + 95,3; für (K, J) + 80,1 Kal.
Andrews fand 1843 direkt für (K,Cl) 102,7 Kal.

In die obige Rechnung gehen also die Bildungs- und Lösungswärme der Säure und Base, die Neutralisationswärme, die Bildungswärme des Wassers und die Lösungswärme des Salzes ein. Die Neutralisationswärmen werden später gesondert behandelt, ebenso die Lösungswärmen. Die Werte für die Säuren finden sich in den vorausgehenden Tabellen: also können wir uns in der folgenden Tabelle kurz fassen.



direkt best.	$Li + H_2O + aq.$	=	$LiOH, aq. + H + 49,1$ Kal. (andere Angabe + 53,2); Lösungswärme + 5,8 Kal.
	$Na + H_2O + aq.$	=	$NaOH, aq. + H + 43,45$ Kal.; Lösungswärme + 9,94 Kal.
	$K + H_2O + aq.$	=	$KOH, aq. + H + 48,10$ Kal.; Lösungswärme + 13,29 Kal.
abgeleit.	$K + O + Cl, aq.$	=	$KOCl, aq. + 88,8$ Kal.
	$K + 3O + Cl, aq.$	=	$KClO_3 + 95,0$ Kal; Lösungswärme — 10,04 Kal.
	$K + 4O + Cl$	=	$KClO_4 + 113,1$ Kal.; Lösungswärme — 12,1 Kal.
	$2Na + 2O$	=	$Na_2O_2 + 119,8$ Kal.
dir.	$Rb + H_2O + aq.$	=	$RbOH, aq. + H + 47$ bis 48 Kal.; Angaben schwanken; Lösungswärme + 14,25 Kal.
,,	$Cs + H_2O + aq.$	=	$CsOH, aq. + H + 48,5$ bis 51,5 Kal.; Angaben schwanken; Lösungswärme + 15,9 Kal.
	$Cu + O$	=	$CuO + 37,16$ Kal.

dir.	$Cu + S_{rh}$	$= CuS + 11{,}6$ Kal.	
	$2Cu + O$	$= Cu_2O + 40{,}8$ Kal.	
dir.	$2Cu + S_{rh}$	$= Cu_2S + 19{,}0$ Kal.	
	$2Ag + O$	$= Ag_2O + 5{,}9$ Kal.	
	$Ag + Cl$	$= AgCl + 29{,}94$ Kal.	Abnahme der Wärmetönung mit dem Atomgewicht des Halogens.
	$Ag + Br$	$= AgBr + 23$ Kal.	
	$Ag + J$	$= AgJ + 15{,}03$ Kal.	
	$Au + Cl$	$= AuCl + 5{,}8$ Kal.	
	$Au + Br$	$= AuBr - 0{,}1$ Kal.	
	$Au + J$	$= AuJ - 5{,}5$ Kal.	
	$Au + 4Cl + H + aq.$	$= HAuCl_4, aq. + 71{,}1$ Kal.	

2. Berylliumgruppe.

	$Be + 2Cl$	$= BeCl_2 + 155$ Kal.; Lösungswärme $+ 44{,}5$ Kal.
dir.	$Mg + 2HCl, aq.$	$= MgCl_2, aq. + 2H + 110{,}2$ Kal.; Lösungswärme $+ 35{,}9$ Kal.
,,	$Mg + O$	$= MgO + 143{,}9$ Kal.
,,	$Ca + O$	$= CaO + 151{,}9$ Kal.; Lösungswärme $+ 18{,}3$ Kal.
,,	$Sr + 2HCl, aq.$	$= SrCl_2, aq. + 2H + 128{,}0$ Kal.; Lösungswärme $+ 11{,}1$ Kal.
	$Ba + O + H_2O$	$= Ba(OH)_2 + 148{,}5$ Kal. (sehr unsicher); Lösungswärme $+ 12{,}3.$ Kal.
dir.	$Zn + 2HCl, aq.$	$= ZnCl_2, aq. + 2H + 36{,}6$ Kal.; Lösungswärme $+ 15{,}6$ Kal.
,,	$Cd + 2HCl, aq.$	$= CdCl_2, aq. + 2H + 17{,}2$ Kal.; Lösungswärme $+ 3{,}0$ Kal.
	$2Hg + O$	$= Hg_2O + 22{,}2$ Kal.
	$Hg + Cl$	$= HgCl + 31{,}3$ Kal. — Abnahme der Wärmetönung mit steigendem Atomgewicht des Halogens.
	$Hg + Br$	$= HgBr + 24{,}5$ Kal.
	$Hg + J$	$= HgJ + 14{,}2$ Kal.
	$Hg + O$	$= HgO + 20{,}7$ Kal.
	$Hg + 2Cl$	$= HgCl_2 + 53{,}3$ Kal.: Lösungswärme $- 3{,}3$ Kal.
dir.	$Hg + 2Br$	$= HgBr_2 + 40{,}5$ Kal.
	$Hg + 2J$	$= HgJ_{2\,gelb} + 24{,}3$ Kal.

3. Borgruppe.

dir.	$Al + 3HCl, aq.$	$= AlCl_3, aq. + 3H + 127{,}0$ Kal.; Lösungswärme $+ 76{,}85$ Kal.
	$2Al + 3\,O$	$= Al_2O_3 + 380$ Kal.
	$2Tl + O$	$= Tl_2O + 42{,}25$ Kal.; Lösungswärme $- 3{,}08$ Kal.
	$Tl + 3Br + aq.$	$= TlBr_3, aq. + 56{,}45$ Kal.
	$Nd + 3Cl$	$= NdCl_3 + 249{,}5$ Kal.; Lösungswärme $+ 35{,}4$ Kal.
	$2Pr + 3\,O$	$= Pr_2O_3 + 412{,}4$ Kal.
	$2La + 3\,O$	$= La_2O_3 + 447{,}3$ Kal.
	$Ce + O_2$	$= CeO_2 + 224{,}6$ Kal.

4. Eisengruppe.

dir.	$Fe + 2HCl, aq.$	$= FeCl_2, aq. + 20{,}8$ Kal.; Lösungswärme $+ 17{,}85$ Kal.
	$Fe + O$	$= FeO +$ ca. $60{,}4$ Kal.
dir.	$3Fe + 4\,O$	$= Fe_3O_4 + 267{,}4$ Kal.
	$Fe_3 + C_{Graph}$	$= Fe_3C - 15{,}3$ Kal.
	$FeCl_2, aq. + Cl$	$= FeCl_3, aq. + 27{,}77$ Kal.; Lösungswärme $+ 31{,}4$ Kal.
dir.	$Ni + 2HCl, aq.$	$= NiCl_2, aq. + 16{,}19$ Kal.; Lösungswärme $+ 19{,}2$ Kal.
	$2Ni(OH)_2 + O + H_2O$	$= 2Ni(OH)_3 + 1{,}3$ Kal.
dir.	$Co + 2HCl, aq.$	$= CoCl_2, aq. + H_2 + 15{,}07$ Kal.; Lösungswärme $+ 18{,}3$ Kal.
	$2Co(OH)_2 + O + H_2O$	$= 2Co(OH)_3 + 22{,}6$ Kal.
dir.	$Mn + 2HCl, aq.$	$= MnCl_2, aq. + H_2 + 49{,}37$ Kal.; Lösungswärme $+ 16{,}0$ Kal.
dir.	$3Mn + 4\,O$	$= Mn_3O_4 + 329$ Kal.
	$Mn + 2\,O$	$= MnO_2 +$ ca. 120 Kal.
	$Mn(OH)_2 + O$	$= MnO(OH)_2 + 21{,}56$ Kal.
	$K + Mn + 4\,O$	$= KMnO_4 +$ ca. 195 Kal.; Lösungswärme $- 10{,}4$ Kal.

5. Kohlenstoffgruppe.

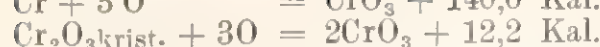
dir.	$Sn + 2HCl, aq.$	$= SnCl_2, aq. + 2H + 2{,}51$ Kal.; Lösungswärme $+ 0{,}35$ Kal.
	$SnCl_2, aq. + Cl_2$	$= SnCl_4, aq. + 76{,}03$ Kal.; Lösungswärme $+ 29{,}9$ Kal.
	$Sn + O$	$= SnO_{krist.} + 66{,}2$ Kal.
	$Sn + 2\,O$	$= SnO_{2\,krist.} + 137{,}2$ Kal.
	$Pb + O$	$= PbO + 50{,}30$ Kal.
	$PbO + O$	$= PbO_2 + 12{,}6$ Kal.
dir.	$Th + 2\,O$	$= ThO_2 + 326{,}0$ Kal.
,,	$Th + 4Cl$	$= ThCl_4 + 300{,}2$ Kal.

6. Osmium- und Rutheniumgruppe.

	$Pd + O + H_2O$	$= Pd(OH)_2 + 22{,}7$ Kal.
	$Pd + 2Cl$	$= PdCl_2 + 40{,}5$ Kal.
	$Pd + 2J$	$= PdJ_2 + 13{,}4$ Kal.
	$Pt + O + H_2O$	$= Pt(OH)_2 + 19{,}2$ Kal.
	$Pt + 2Cl + 2HCl, aq.$	$= H_2PtCl_4, aq. + 41{,}8$ Kal.
	$Pt + 4Cl + 2K(Na, H$ etc.$)Cl, aq.$	$= K_2(Na_2, H_2$ etc.$)PtCl_6, aq. + 84{,}6$ Kal.

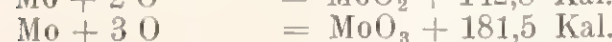
7. Chromgruppe.


$Cr + 3\,O = CrO_3 + 140{,}0$ Kal.; Lösungswärme $+ 1{,}9$ Kal.


$Cr_2O_{3\,krist.} + 3O = 2CrO_3 + 12{,}2$ Kal.

Die Wärmetönungen der Chromisalze sind widerspruchsvoll.


$Mo + 2\,O = MoO_2 + 142{,}8$ Kal.


$Mo + 3\,O = MoO_3 + 181{,}5$ Kal.


$W + 2\,O = WO_2 + 131{,}4$ Kal.


$W + 3\,O = WO_3 + 194$ Kal.

4. **Schmelz-, Verdampfungs-, Umwandlungs- und Lösungswärmen.** Als Hilfsgrößen oder Korrekturen gehen in die thermochemischen Rechnungen häufig die Wärmetönungen mehr physikalischen Charakters ein, welche die Aenderung der Zustandsform der reagierenden Stoffe begleiten, die Schmelzwärme, die Verdampfungswärme und die Umwandlungswärme; zu diesen tritt als häufigste die Lösungswärme, die schon mehr chemischen Charakter besitzt; denn daß die Auflösung mit einer Reihe von chemischen Vorgängen wie Hydratation (oder allgemeiner Solvatation genannt) und Dissoziation verbunden ist, wird jetzt wohl allgemein angenommen, während man den Lösungsvorgang früher mehr als rein physikalisch ansah.

4a) Schmelzwärme. Die Bestimmung geschieht fast immer nach der Mischungsmethode, setzt also genaue Kenntnis der spezifischen Wärmen beider Aggregatzustände voraus; läßt sich die Substanz unterkühlen, so wird man besser die Erstarrungswärme messen, die sich von der Schmelzwärme wenig unterscheidet (vgl. Abschnitt 2a S. 1099).

Die Abhängigkeit der Schmelzwärme vom Druck und der Temperatur ist praktisch bedeutungslos. An indirekten Methoden, die Größe zu messen, stehen mehrere zur Verfügung; doch ist nur die Berechnung aus der molekularen Gefrierpunktserniedrigung praktisch von Bedeutung. Ist T die absolute Schmelztemperatur des reinen Lösungsmittels, q die Schmelzwärme pro Gramm, R wie üblich die Gaskonstante, 1,985 in kalorischem Maß, so ist die Gefrierpunktserniedrigung, die c Mole in 1000 g Lösungsmittel hervorbringen,

$$dT = \frac{RT^2 . c}{q . 1000} \qquad 12)$$

Analoge Formeln gelten für die Aenderung des Siedepunktes, des Umwandlungspunktes von Hydraten und des Klärungspunktes von flüssigen Kristallen.

	Schmelzwärmen von Elementen		Schmelzwärmen von anorganischen Verbindungen			Schmelzwärmen von organischen Verbindungen		
	g-kal. pro g	kg-Kal. pro g-Atom		g-kal. pro g	kg-Kal. pro Mol		g-kal. pro g	kg-Kal. pro Mol
Br	16,2	1,29	Eis	79,67	1,44	Ameisensäure	57,4	2,6
$P_{weiß}$	5,0	0,16	H_2SO_4	26,0	2,55	Essigsäure	45,8	2,75
$S_{rh.}$	13,3	0,43	$H_2SO_4 . H_2O$	38,4	4,45	Buttersäure	28,4	2,5
$S_{mon.}$	10,0	0,32	H_3PO_3	37,4	3,07	Caprinsäure	22,7	3,9
Hg	2,75	0,55	H_3PO_2	35,0	2,31	Benzol	30,4	2,37
Na	17,8	0,41	$SbCl_3$	13,3	3,0	p-Xylol	39,3	4,2
K	13,6	0,53	$CaCl_2 . 6H_2O$	40,7	8,9	Naphtalin	35,5	4,5
Rb	6,1	0,52	Na_2SO_4			Diphenyl	28,5	4,4
Tl	7,2	1,47	$. 10H_2O$	51,2	16,5	Phenol	24,9	2,3
Sn	14	1,7				p-Kresol	26,3	2,8
Pb	5,4	1,1				Acetophenon	33,1	4,0
						Benzophenon	23,5	4,3
						Menthol	18,9	3,0
						Nitrobenzol	22,5	2,8
						Zimtsäuremethylester	26,4	4,3

Die Zusammenstellung läßt keine Zusammenhänge zwischen Schmelzpunkt, Konstitution und Schmelzwärme erkennen; solche sind kaum bekannt. Die Schmelzwärmen sind durchweg klein gegen die bei den meisten chemischen Reaktionen auftretenden Wärmetönungen; speziell ändern sich die Schmelzwärmen selbst der kompliziertesten organischen Gebilde wenig, wenn man Gruppen wie CH_2 u. dgl. einfügt, wovon beim Vergleich der Verbrennungswärmen homologer Körper viel Gebrauch gemacht wird.

4b) Verdampfungswärme. Man bestimmt die beim Verdunsten fortgeführte oder die beim Kondensieren von Dampf gewonnene Wärme. Indirekt kann man die Größe aus dem Temperaturgang des Dampfdrucks ableiten vgl. Abschnitt 2c Formel (6);

ebenso kann man die molekulare Siedepunktserhöhung benutzen. Zwischen Siedepunkt und Verdampfungswärme besteht eine empirische Beziehung, die sogenannte Troutonsche Regel, die dann von Nernst verändert und einem größeren Temperaturbereich angepaßt ist. Nach Trouton ist

mol. Verd.-W.: abs. Siedep. $_{760}$ = ca. 21;

nach Nernst ist der Ausdruck = 9,5 log T — 0,007 T.

Daß beim Verdampfen äußere Arbeit geleistet wird, die man nach Formel 2) S. 1100 berechnen kann, ist selbstverständlich.

Verdampfungswärmen (beim Siedepunkt$_{760}$) von

Elementen	g-kal. pro g	kg-Kal. pro g-Atom	anorganischen Verbindungen	g-kal. pro g	kg-Kal. pro Mol
H	124	0,125	H_2O	536—539	9,7
N	48,7	0,68	(bei 0°	597—607	10,8)
O	51,1	0,82	SO_2	96	6,2
Cl	62	2,2	HNO_3	115	7,3
Br	44	3,5	CS_2	85,2	6,5
Hg	68	13,6	NH_3	331	5,6
			HF	360	7,2
			CCl_4	46,4	7,1
			$SiCl_4$	37,3	6,4
			$SnCl_4$	31	8,1

organischen Verbindungen

1. Aliphatische	g-kal. pro g	kg-Kal. pro Mol
Pentan	85,0	6,13
Isopentan	81,4	5,87
Oktan	71	8,1
Dekan	60,5	8,6
Methylchlorid	97	4,9
Methyljodid	46	6,5
Chloroform	58,5	7,0
Cyanwasserstoff	211	5,7
Methylalkohol	264	8,45
Aethylalkohol	205	9,4
Propylalkohol	166	10,0
Aethyläther	90	6,7
Aceton	125	7,3
Ameisensäure	120	5,55
Essigsäure	97	5,8
Buttersäure	114	10,0
Ameisensäuremethylester	115	6,9
Ameisensäureäthylester	100	7,4
Ameisensäurepropylester	90	7,9
Essigsäureäthylester	88	7,8
Essigsäureisoamylester	68	8,8
2. Zyklische		
Zyklohexan	85,4	7,2
Benzol	94,4	7,35
Toluol	87	8,0
Xylole (Mittel)	82	8,7
Cymol	67	9,0
Fluorbenzol	79,3	7,6
Chlorbenzol	74,0	8,3
Brombenzol	55,6	8,7
Jodbenzol	46,5	9,5
Pyridin	103	8,1
Anilin	110	10,2

Eine abnorm große Verdampfungswärme oder, was auf dasselbe herauskommt, eine Abweichung von der Troutonschen Regel nach oben beweist, daß die Flüssigkeit assoziierter ist als der Dampf (Wasser, die Alkohole, einige Säuren usw.). Die Verdampfungswärme enthält alsdann Dissoziationswärme. Die Verdampfungswärmen steigen in einer homologen Reihe an, wie z. B. die Zahlen für die Kohlenwasserstoffe und die Ester zeigen.

Da die Dämpfe stets eine kleinere spezifische Wärme haben als die Flüssigkeiten, nehmen alle Verdampfungswärmen mit steigender Temperatur ab (um beim kritischen Punkt unendlich klein zu werden).

4c) Umwandlungswärmen. Bei genauerer Forschung hat es sich ergeben, daß eine Unzahl von festen chemischen Verbindungen und Elementen in mehreren Modifikationen auftreten, die einen verschiedenen Energieinhalt besitzen; bei Gasen ist nur der Fall Ozon-Sauerstoff bekannt, bei Flüssigkeiten mit Sicherheit kein einziger; denn die d- und l-Modifikationen haben den gleichen Energieinhalt. Die amorphen Körper gehen unter Wärmeentwickelung in die kristallisierten über, da ein amorpher Körper ja eine unterkühlte Flüssigkeit ist.

Da die verschiedenen Modifikationen verschiedene spezifischen Wärmen haben, ändert sich die Umwandlungswärme mit der Temperatur; die unter Wärmeentwickelung entstehenden Formen haben (fast ausnahmslos) die kleineren spezifischen Wärmen.

Nur in wenigen Fällen verläuft die Umwandlung von allotropen Modifikationen bei Zimmertemperatur so rasch und vollständig, daß die Wärmetönung sicher gemessen werden kann. Man muß also zur Messung meist beide Modifikationen in einen anderen identischen Zustand oder eine identische Verbindung überführen und die Differenz beider Wärmetönungen als Umwandlungswärme nehmen; solche Wege sind Lösen oder Oxydieren. Man erhält die Umwandlungswärme um so genauer, je mehr Prozent sie von der gemessenen Wärmetönung ausmacht. Beim Kohlenstoff, wo die Verbrennung der einzig mögliche Weg ist, beide Modifikationen in denselben Zustand überzuführen, ist nur eine geringe Genauigkeit zu erreichen, da die beiden Verbrennungswärmen nur um etwa 2 Promill verschieden sind. Bei einigen wenigen organischen Verbindungen geht die Reaktion in der Hitze schnell und ziemlich eindeutig vor sich, so daß man durch Kalorimetrierung bei 100° oder Einsenken eines kleinen elektrischen Oefchens in das Kalorimeter direkt und ziemlich genau messen konnte (Roth).

Einige Umwandlungswärmen:

Schwefel (mon. → rh.) 0,08 Kal. pro g-Atom bei 0°; 0,10 beim Umwandlungspunkt.
„ (am. → rh.) 0,8 Kal. pro g-Atom (Zimmertemperatur).
Selen (am. → krist.) 1,4 Kal. pro g-Atom.
Phosphor (weiß → rot) ca. 4 Kal. pro g-Atom.
Antimon (explos. → gew.) 2,3 Kal. pro g-Atom.
Diamant → Graphit 0,18 Kal. pro g-Atom. (Zimmertemperatur.)
Amorphe Kohle → Graphit ca. 2,5 Kal. pro g-Atom (Zimmertemperatur). Unsicher
SiO_2 (am. → krist.) 2 Kal. pro Mol.
As_2O_3 (am. glasig → opak regul.) 2,6 Kal. pro Mol.
HgS (schwarz am. → rot krist.) 0,3 Kal. pro Mol.
HgJ_2 (gelb → rot) 3,0 Kal. pro Mol.
$NH_4.NO_3$ (rh. I → rh. II) — 0,40 Kal. pro Mol bei ca. 33°.
$NH_4.NO_3$ (rh. II → rhomboedr.) — 0,43 Kal. pro Mol bei ca. 84°.
$NH_4.NO_3$ (rhomboedr. → reg.) — 0,95 Kal. pro Mol.
KNO_3 (rhomboedr. → prism.) + 1,19 Kal. pro Mol.
$CaCO_3$ (Aragonit → Calcit) — 0,3 Kal. pro Mol.
$CaCO_3$ (am. → Aragonit) + 1,7 Kal pro Mol.

Weitere Umwandlungswärmen von Isomeren und Polymeren folgen aus den Verbrennungswärmen durch Differenznahme (vgl. letzten Abschnitt).

4d) Lösungswärme, die praktisch und wohl auch theoretisch wichtigste der genannten thermochemischen Hilfsgrößen. Die Bestimmung ist, außer etwa bei Gasen, leicht: bei löslichen Körpern mißt man direkt, bei unlöslichen oder schwer löslichen bestimmt man umgekehrt die Fällungswärme. Fast immer ist die Wärmetönung von der Temperatur, namentlich aber von der Konzentration der entstehenden Lösung etwas abhängig.

Man unterscheidet die integrale, die erste und die letzte Lösungswärme, d. h. die Wärmetönung für die insgesamt in Lösung gehende Substanz, von Wasser bis zur gesättigten Lösung, für die ersten und die letzten Anteile, d. h. wenn man in einer fast gesättigten Lösung noch etwas löst. Die letzte Art nennt man auch die „differentielle". Stets wird auf ein Mol gelöster Substanz umgerechnet. Die verschiedenen Wärmetönungen können sich sogar nach dem Vorzeichen unterscheiden. Bei schwer löslichen Körpern werden die drei Arten Lösungswärme identisch; sind sie verschieden, so ist der Unterschied, wie eine einfache Ueberlegung ergibt, die Verdünnungswärme.

Nach dem zweiten Hauptsatz ergibt die Lösungswärme (für verdünnte Lösungen!) nach Größe und Vorzeichen den Temperaturkoeffizienten der Löslichkeit; vgl. Abschnitt 2c S. 1103. Hier geht die letzte Lösungswärme in die Gleichung ein. Wird bei der Auflösung Wärme gebunden, so steigt die Löslichkeit mit der Temperatur, auch wenn, wie z. B. beim $CuCl_2 . H_2O$ Wärme entwickelt wird, wenn man nicht von vornherein mit einer konzentrierten Lösung als Lösungsmittel arbeitet, sondern die erste Lösungswärme mißt.

Solche (scheinbaren!) Ausnahmen erklären sich meist durch Hydratation; daß eine ganze Reihe von Stoffen, namentlich Salzen, in Lösung hydratisiert ist, geht daraus hervor, daß häufig die Lösungswärme der Hydrate ein anderes Vorzeichen hat als die Lösungswärme des hydratisierten Stoffs. Daß wässerige Lösungen und nichtwässerige keine prinzipiellen Unterschiede zeigen, hat namentlich Walden durch eine Reihe von groß angelegten Untersuchungen gezeigt.

In die folgende Tabelle sind, aus Platzmangel, nur Daten für wässerige Lösungen aufgenommen.

Substanz	Mole H_2O	Kal. pro Mol
Gase		
HCl	300	+ 17,32
HBr	400	+ 19,94
HJ	500	+ 19,21
H_2S	900	+ 4,56
NH_3	200	+ 8,43
SO_2	250	+ 7,70
CO_2	1500	+ 5,88
Cl_2	—	+ 4,87
Flüssigkeiten		
Br_2	600	+ 1,08
SO_3	1600	+ 39,17
H_2SO_4	1600	+ 17,85
HNO_3	300	+ 7,48

Substanz	Mole H_2O	Kal. pro Mol
Feste Säuren und Säureanhydride		
J_2O_5	—	— 1,79
HJO_3	200	— 2,17
P_2O_5	550	+ 35,00
H_3PO_4	120	+ 2,69
As_2O_5		+ 6,00
H_3AsO_4	230	— 0,40
SeO_2	200	— 0,92
CrO_3	220	+ 1,9
Oxalsäure (anhydrisch)	300	— 2,26
„ + $2H_2O$	530	— 8,59
Weinsäure	400	— 3,00
Bernsteinsäure	–	— 6,70
Benzoesäure		— 6,70
(Rohrzucker	– –	— 0,80)

Ameisensäure	200	+ 0,15
Essigsäure	200	+ 0,375
Methylalkohol	viel	+ 2,0
Aethylalkohol	,,	+ 2,54
Propylalkohol	,,	+ 3,05
Aethyläther	,,	+ 5,94

Zum Teil nach älteren Angaben (Horstmann, Lehrbuch d. phys. u. theor. Chemie; Braunschweig 1885).

Feste Basen

LiOH	400	+ 5,8
NaOH	200	+ 9,94
KOH	250	+ 13,29
RbOH	—	+ 14,3
CsOH	330	+ 15,9
TlOH	235	— 3,16
$Ca(OH)_2$	2500	+ 2,79
$Sr(OH)_2$	—	— 11,64
$Ba(OH)_2$	—	+ 12,26
$Ba(OH)_2 . 8H_2O$	400	— 15,21

Salze.

	Mole H_2O pro Mol	Kal.		Mole H_2O pro Mol	Kal.
LiCl	230	+ 8,44	$MgCl_2 . 6H_2O$	400	+ 3,0
LiBr	—	+ 11,33	$MgBr_2$	—	+ 43,3
LiJ	–	+ 14,89	Aehnlich Jodid		
Li_2SO_4	200	+ 6,05	$MgSO_4$	400	+ 20,28
$LiNO_3$	100	+ 0,30	$MgSO_4 . 7H_2O$	400	— 3,80
Na_2S	1000	+ 15,0	$MgSO_4 . K_2SO_4$	600	+ 10,60
Bei Hydraten von Na_2S negativ			$MgSO_4 . K_2SO_4 . 6H_2O$	600	— 10,02
NaCl	325	— 1,01	$ZnCl_2$	300	+ 15,63
NaBr	200	— 0,19	$ZnSO_4$	400	+ 18,43
$NaBr . 2H_2O$	300	— 4,71	$ZnSO_4 . 7H_2O$	400	— 4,26
Aehnlich NaJ			$CdCl_2$	400	+ 3,01
Na_2SO_4	400	+ 0,45	$CdBr_2$	400	+ 0,44
$Na_2SO_4 . 10H_2O$	400	— 18,76	CdJ_2	400	— 0,96
Aehnlich Thiosulfat			$CdSO_4$	400	+ 10,74
$NaNO_3$	200	— 5,03	$CdSO_4 . 8/3 H_2O$	400	+ 2,66
$Na_2HPO_4 . 12H_2O$	400	— 22,8	$AlCl_3$	1250	+ 76,85
Aehnlich Borax			$KAl(SO_4)_2 . 12H_2O$	1200	— 10,1
KCl	200	— 4,44	$CrCl_3$		+ 35,9
KBr und KJ	200	— 5,1	$2CrCl_3 . 13H_2O$ grün	—	— 0,1
KCN	175	— 3,0	$2CrCl_3 . 13H_2O$ grau	-	+ 24,0
KCNS	200	— 6,1	$Cr_2(SO_4) . 8H_2O$ grün		— 13,6
$KClO_3$	400	— 10,0	$Cr_2(SO_4) . 8H_2O$ violett	-	+ 6,2
$KClO_4$	460	— 12,13	K_2CrO_4	540	— 5,25
$KBrO_3$	200	— 9,76	$K_2Cr_2O_7$	400	— 16,70
KJO_3	500	— 6,8	$MnCl_2$	350	+ 16,01
K_2SO_4	400	— 6,37	$MnCl_2 . 4H_2O$	400	+ 1,54
$KHSO_4$	200	— 3,80	$MnSO_4$	400	+ 13,79
KNO_3	200	— 8,52	$MnSO_4 . 5H_2O$	400	+ 0,04
K_2CO_3	400	+ 6,5	$KMnO_4$	500	— 10,4
RbCl	100	— 4,7	$FeCl_2$	350	+ 17,85
Rb_2SO_4	—	— 6,7	$FeSO_4 . 7H_2O$	400	— 4,51
CsCl	–	— 4,75	K_4FeCy_6	820	— 12,0
Cs_2SO_4	—	— 4,97	$K_4FeCy_6 . 3H_2O$	940	— 16,9
NH_4SH	900	— 3,25	$FeCl_3$	1000	+ 32,68
NH_4Cl	200	— 3,88	$FeNH_4(SO_4)_2 . 12H_2O$	500	— 16,6
$(NH_4)_2SO_4$	400	— 2,37	K_3FeCy_6	400	— 14,4
NH_4NO_3	200	— 6,32	$CoCl_2$	400	+ 18,34
$NH_4NaHPO_4 . 4H_2O$	800	— 10,7[illegible]	$CoCl_2 . 6H_2O$	400	— 2,85
CaF_2	—	— 2,7[illegible]	$CoSO_4 . 7H_2O$	800	— 3,57
$CaCl_2$	300	+ 17,41	$Co(NO_3)_2 . 6H_2O$	400	— 4,96
$CaCl_2 . 6H_2O$	400	— 4,3	$NiCl_2$	400	+ 19,17
Aehnlich Bromid			$NiCl_2 . 6H_2O$	400	— 1,16
$CaSO_4$	—	+ 4,44	$NiSO_4 . 7H_2O$	800	— 4,25
$CaSO_4 . 2H_2O$	—	— 0,30	$CuCl_2$	600	+ 11,08
$SrCl_2$	400	+ 11,14	$CuCl_2 . 2H_2O$	400	+ 4,21
$SrCl_2 . 6H_2O$	400	— 7,[illegible]	$CuSO_4$	400	+ 15,80
$SrSO_4$	-	[illegible]	$CuSO_4 . 5H_2O$	400	— 2,75
$BaCl_2$	400	+ 2,07	$Cu(NO_3)_2 . 6H_2O$	400	— 10,71
$BaCl_2 . 2H_2O$	400	— 4,93	AgF	—	+ 3,4
$BaSO_4$	—	[illegible]	AgCl	—	— 15,87
$BeCl_2$	—	+ 44,5	AgBr	—	— 20,13
$BeSO_4 . 4H_2O$	400	+ 1,1	AgJ	–	— 26,44
MgF_2	—	+ 2,78	$KAgCy_2$	440	— 8,35
$MgCl_2$	800	+ 35,92	$AgNO_3$	200	— 5,44

Salze.

	Mole H_2O pro Mol	Kal.
$HAuCl_4.3H_2O$	400	— 3,55
$HgCl_2$	300	— 3,30
$HgCy_2$	—	— 3,0
$TlCl$	4500	— 10,10
$TlBr$	—	— 13,75
TlJ	—	— 17,85
Tl_2SO_4	1000	— 8,28
$TlNO_3$	300	— 9,97
$PbCl_2$	1800	— 6,80
$PbBr_2$	2500	— 10,04
PbJ_2	—	— 15,97
$Pb(NO_3)_2$	400	— 7,61
$SnCl_2$	300	— 0,35
$SnCl_2.2H_2O$	200	— 5,37
$SnCl_4$	300	+ 29,92
$UO_2(NO_3)_2.3H_2O$		— 3,7
$UO_2Cl.H_2O$		+ 6,05
K_2PtCl_6	—	— 13,76
$Na_2PtCl_6.6H_2O$	900	— 10,63

Aus dieser Tabelle geht folgendes hervor. Die Differenz der Lösungswärme eines wasserfreien und eines kristallwasserhaltigen Salzes liefert ohne weiteres, da man ja zu übereinstimmenden Lösungen gelangt, die (stets positive) Hydratationswärme.

Daß die Lithiumsalze in Lösung stark hydratisiert sind, folgt unter anderem aus ihren Gefrierpunktserniedrigungen; damit stehen die durchweg positiven Lösungswärmen, die der mit steigender Temperatur zunehmenden Löslichkeit zuwiderlaufen, aufs Beste überein. Die Kaliumsalze, deren Gefrierpunktserniedrigungen durchweg normaler, d. h. kleiner sind, geben, bis auf das auch im kristallisierten Zustand wasserhaltige Karbonat, negative Lösungswärmen, dem Temperaturgang der Löslichkeit entsprechend. Man sieht, wie vorsichtig man bei leicht löslichen Salzen mit der Anwendung des Le Chatelierschen Prinzips sein muß! Ferner ist, wenn bei der Auflösung in viel Wasser eine fast vollständige Zersetzung eintritt, wie beim Zinntetrachlorid, die Lösungswärme abnorm hoch. Von den schwerlöslichen Haloidsalzen von Ag, Tl und Pb haben die Jodide die größte, die Chloride die kleinste Fällungswärme; da diese auch bei den Chloriden noch groß ist, also die Löslichkeit stark mit der Temperatur ansteigt (vgl. beim AgCl Abschnitt 2c S. 1103) muß bei der analytischen Verwendung der Salze darauf Rücksicht genommen werden.

5. Thermochemie der Ionen. 5a) Gesetz von der Thermoneutralität der Salzlösungen. Heß stellte 1842 den Erfahrungssatz auf, daß beim Vermischen von Salzlösungen keine irgend erheblichen Wärmetönungen auftreten. In Anlehnung an J. B. Richters Gesetz der „spezifischen Neutralisationszahlen" nannte er den Erfahrungssatz des Gesetz der „Thermoneutralität". Die Erklärungen, die er und seine Zeitgenossen gaben, befriedigen uns heut nicht mehr. Für uns ist das Gesetz, mitsamt den gleich zu besprechenden Ausnahmen, eine direkte Konsequenz der Arrheniusschen Theorie von der elektrolytischen Dissoziation. Danach sind fast alle Salze in verdünnten Lösungen gleich und fast vollständig dissoziiert. Vermischt man also zwei verdünnte Lösungen, so bestehen, falls nicht Fällung, Komplexbildung oder Zerfall von Komplexen eintritt, die Ionen in der gemischten Lösung nebeneinander, wie sie vorher in den getrennten Lösungen bestanden hatten. Handelt es sich um konzentriertere Lösungen, und tritt ein geringer Austausch ein (z. B. KJ + NaCl = KCl + NaJ), so bewirkt dieser ebenfalls keine Wärmetönung, weil sich die Bildungswärmen der Salze aus Säure und Base kaum unterscheiden (s. nächsten Abschnitt Neutralisationswärme). Der Empiriker Heß war also auch bei der Aufstellung dieses Satzes, genau wie bei dem Gesetz der konstanten Wärmesummen, seiner Zeit vorangeeilt.

Bei den Lösungen der Hg- und Cd-Salze fand Thomsen Abweichungen vom Heßschen Gesetz: Während die Umsetzung von $BaCl_2$, $BaBr_2$ und BaJ_2 mit H_2SO_4 zu denselben Wärmetönungen, ca. 9,6 Kal., führte, ergaben sich für die drei Cd-Salze Verschiedenheiten, die zwischen dem Chlorid und dem Jodid fast 4 Kal. betragen! Die Elektrochemie, speziell die klassischen Arbeiten Hittorfs über die Ueberführungszahlen der Cd-Salze, geben die Erklärung dieser Anomalie: Die Salze sind auch in verdünnten Lösungen schwach dissoziiert, dafür nicht unerheblich assoziiert, bei weitem am stärksten das Jodid, am schwächsten das Chlorid. Da also bei Umsetzungen mit anderen Anionen Aenderungen im Dissoziations- und Assoziationszustand eintreten, kann das Gesetz der Thermoneutralität nicht gelten. Thomsen fand ferner, daß sich beim Mischen von Merkurinitrat- und Alkalichloridlösungen eine erhebliche Wärme entwickelt. Es bildet sich aus dem schwach exothermen, stark dissoziierten Nitrat das stark exotherme, aber zu Autokomplexbildung neigende, kaum dissoziierte Merkurichlorid; das kann man aus Gefrierpunktsbestimmungen, Leitvermögensmessungen u. dgl. ableiten. Vergl. auch den Artikel „Berylliumgruppe". Gerade die Abweichungen von dem Gesetz der Thermoneutralität sind eine starke Stütze der Arrheniusschen Theorie geworden.

5b) Neutralisationswärmen. Wie man mit mehr oder weniger Berechtigung aus der Bildungswärme von Nichtmetallverbindungen die Affinität der Komponenten zueinander ableitete, hoffte man wohl aus den

Neutralisationswärmen die Affinitäten der Basen zu den verschiedenen Säuren, also ein Maß für deren Stärken zu gewinnen. Man fand indessen, daß beim Neutralisationsvorgang, wenn das Salz dem Gesetz der Thermoneutralität gehorcht, die besondere Natur des Salzes gar keine Rolle spielt.

Steht man auf dem Boden der Dissoziationstheorie, so ist der Befund selbstverständlich; denn schreibt man den Neutralisationsvorgang zwischen einer starken Säure und Base „ionisch“, so ergibt sich folgendes: $Na^{\cdot} + OH' + H^{\cdot} + Cl' = Na^{\cdot} + Cl' + H_2O$ oder nach Abzug des unverändert bleibenden: $H^{\cdot} + OH' = H_2O$, d. h. die einzige Reaktion ist die Bildung von nicht dissoziiertem Wasser aus seinen Ionen. Die Dissoziationswärme des Wassers zwischen 18 und 25° ist früher (vgl. Abschnitt 2c S. 1103) zu 13,8 Kal. abgeleitet. Thomsen fand für ca. 0,28 n. Lösungen bei 18 bis 20° folgende Zahlen für die „Neutralisationswärmen“:

Na,Cl + 13,78	Na,BrO_3 + 13,78
Na,Br + 13,75	Na,JO_3 + 13,81
Na,J + 13,68	Na,NO_3 + 13,68
Na,ClO_3 + 13,76	½ Ba,Cl_2 + 13,89

ebenso für Bromid und Jodid

Li,Cl + 13,85	Tl,NO_3 + 13,69
K,NO_3 + 13,72	½ Sr,Cl_2 + 13,82
K,Cl + 13,75	½ Ca,Cl_2 + 13,95.

Die Zahlen weichen wenig — ihr Mittel gar nicht — von 13,8 ab. Daß die Wärmetönung von der Verdünnung abhängt, ist nicht verwunderlich, da die reagierenden Lösungen durchweg Verdünnungswärmen besitzen. In verdünnten Lösungen findet man kleinere Neutralisationswärmen, die sich asymptotisch einem Endwert nähern. Daß die Wärmetönungen auch von der Temperatur abhängen und zwar genau in dem vom ersten Hauptsatz geforderten Maß, ist früher schon gezeigt worden (Abschnitt 2a S. 1100).

Bei ganz genauen Messungen finden sich zwischen den Na- und den K-Salzen kleine Unterschiede, die zum Teil noch der Aufklärung bedürfen.

Untersucht man schwächere Säuren oder Basen, so findet man andere Zahlen als 13,8 Kal. pro Aequivalent. Die Wärmetönung sei Q'; wir wollen annehmen, daß die Base und das Salz ganz, die Säure gar nicht dissoziiert sei. Alsdann geben folgende Gleichungen die Erklärung des Befundes:



$$B^{\cdot} + OH' + AcH = B^{\cdot} + Ac' + H_2O + Q'$$
$$H^{\cdot} + OH' = H_2O + 13,8.$$

Durch Substraktion folgt: $AcH = H^{\cdot} + Ac' + (Q' - 13,8)$, d. h. die Differenz gegen den Normalwert ist die Dissoziationswärme der Säure; Analoges gilt für die Base. Für mittelstarke Elektrolyte, wo obige Voraussetzungen nicht streng erfüllt sind, muß man eventuell für den anfänglichen Dissoziationsgrad korrigieren, um die Wärmetönung für vollständige Dissoziation zu finden.

Beispiele: Die Neutralisationswärme von HCN mit starken Basen ist nur 2,8 Kal., also werden bei der Aufspaltung von HCN in die Ionen 13,8 — 2,8 = 11,1 Kal. gebunden; die Neutralisationswärme von Ammoniak mit starken Säuren ist um 1,5 Kal. kleiner als der Normalwert, die bei der Dissoziation verbrauchte Wärmetönung ist also 1,5 Kal. Neutralisiert man Ammoniak mit Blausäure, so müssen beide Elektrolyte erst gespalten werden, während ein H_2O aus den Ionen entsteht; die Neutralisationswärme muß also sein + 13,8 — 11,1 — 1,5 = 1,2 Kal. fast genau die Zahl, die Berthelot fand (1,3).

Eine originelle Anwendung der kleinen Verschiedenheiten gewisser Neutralisationswärmen starker Säuren machte Thomsen 1854, also lange bevor man über die Stärken der Säuren und Basen Klarheit hatte, um die Verteilung einer unzureichenden Menge Base zwischen zwei verschieden starken Säuren zu finden. Die Neutralisationswärme der Schwefelsäure ist — bei Verwendung starker Basen — um 4,0 Kal. größer als die der äquivalenten Menge HNO_3. Da die Neutralisationswärmen für beide Säuren genau bekannt waren, konnte Thomsen aus der Neutralisationswärme von einem Aequivalent Base + 1 Aequivalent beider Säuren schließen, wie viel Nitrat und wie viel Sulfat entstanden war, und daraus die relativen Stärken der Säuren berechnen. Thomsen fand, lange vor Guldberg-Waage und Ostwald, ziemlich richtige Werte für die relativen Stärken; er bezieht die Werte auf die Stärken von HCl und HNO_3 (= 1,00) und fand z. B. für H_2SO_4 0,5, für H_3PO_4 0,25 usw.

Auf die Einzelheiten der Messungen, ebenso auf Thomsens Resultate mit mehrbasischen Säuren und verschiedenen Mengen Base, ferner auf die Einwirkung von Säuren auf ihre Neutralsalze kann, so viel Interesse die Zahlen und ihre Interpretation bieten, hier nicht näher eingegangen werden.

5c) Verdünnungswärme; Dissoziationswärme. Versetzt man eine mäßig konzentrierte Lösung eines Elektrolyten mit weiterem Lösungsmittel, so beobachtet man meist eine Wärmetönung, die sogenannte Verdünnungswärme, die von verschiedenem Vorzeichen sein kann. Bei der Verdünnung schreitet die elektrolytische Dissoziation fort; die Verdünnungswärme ist also, von abnormen Fällen abgesehen, ein Teil der Dissoziationswärme. Kennt man den Dissoziationsgrad der Ausgangs- und der Endlösung, so läßt sich die Wärmetönung für

die vollständige Dissoziation leicht berechnen; doch ist bei der Kleinheit der Verdünnungswärmen und der geringen Verschiebung des Dissoziationsgrades durch die — aus praktischen Gründen kleine — Konzentrationsänderung sehr genaues Arbeiten nötig. Statt direkt die Verdünnungswärme zu messen, ist es unter Umständen bequemer die Lösungswärme in verschiedenen Mengen Lösungsmittel zu messen; da es sich dabei um die Differenznahme zwischen zwei wenig verschiedenen Größen handelt, ist ebenfalls größte Genauigkeit erforderlich. Bei den starken Elektrolyten besteht ferner trotz aller Forschungen noch einige Unsicherheit über die Berechnung des Dissoziationsgrades, so daß alle Berechnungen der Dissoziationswärme nur angenähert richtig sein werden. Man weiß also über die Dissoziationswärmen der starken Elektrolyte ziemlich wenig oder hat sich gescheut, das genaue Zahlenmaterial, das Thomsen und Berthelot an Verdünnungswärmen hinterlassen haben, auszunutzen.

HCl Verdünnungswärme: HCl, 10 H_2O auf HCl, 300 H_2O + 1,16 Kal. Dissoziationswärme aus der Verdünnungswärme + 2,0 Kal., aus der Temperaturänderung des Leitvermögens + 1,1 Kal.

HNO_3 Verdünnungswärme im selben Bereich + 0,18; H_2SO_4 + 2,25 Kal.

Für verdünnte Lösungen von Basen und Salzen ist die Verdünnungswärme durchweg klein; ist das Salz anhydrisch, so ist die Verdünnungswärme meist negativ; kristallisiert das Salz mit Wasser, so ist die Verdünnungswärme in der Mehrzahl der Fälle positiv. Die überhaupt von der Dissoziation nicht zu trennende Hydratation scheint also auch bei der Verdünnungswärme eine Rolle zu spielen.

Um die Dissoziationswärme zu erhalten, stehen noch mehr Wege zur Verfügung: die Abweichung der Neutralisationswärme von dem Normalwert 13,8 (bei 18°) gibt direkt oder nach Berücksichtigung der anfänglichen Dissoziation die Dissoziationswärme von schwachen Säuren und Basen. Bei diesen gilt das Ostwaldsche Verdünnungsgesetz oder allgemeiner das Massenwirkungsgesetz; die Aenderung der Dissoziationskonstanten mit der Temperatur läßt also nach der Reaktionsisochore direkt die Dissoziationswärme finden. Schließlich kann man die Größe auch dadurch erhalten, daß man die Wärmetönung mißt, wenn ein stärkerer Elektrolyt (Base oder Säure) einen schwächeren aus einem Neutralsalz verdrängt. (Verdrängungswärme.) Auch kann man statt der Dissoziationskonstanten den davon abhängigen Grad der Hydrolyse eines Salzes bei mehreren Temperaturen messen.

Bei der mäßig starken Fluorwasserstoffsäure und anderen Elektrolyten hat man mehrere Methoden benutzt. An den Abweichungen der Einzelwerte kann man die Grenzen der Methoden erkennen. Die Temperaturen sind wenig verschieden: 18 bis 22°.

Methoden	HF	H_3PO_4
I Verdünn.-W.	+ 3,4	+ 2,1 Kal.
II Verdräng.-W.	+ 3,0	,,
III Neutralis.-W.	+ 2,8	+ 1,5 ,,
IV Temperaturgang des Leitverm.	+ 3,5	,,
V der Hydrolyse	—	+ 1,3 ,,

		HCN	Propionsäure	Bernsteinsäure	NH_3
II	Kal.	— 11,1	— 0,16	— 0,6	—
III	,,	— 11,0	— 0,20	— 1,4	— 1,51
IV	,,	—	— 0,30	— 1,1	—
V	,,	— 10,4	—	—	— 1,44

Sind die Dissoziationswärmen noch kleiner oder gehen sie durch Null hindurch, so weichen die nach verschiedenen Methoden erhaltenen Daten oft noch mehr voneinander ab.

Walden berechnete die Dissoziationswärmen von Jodkalium und Tetraäthylammoniumjodid in verschiedenen Lösungsmitteln aus Leitfähigkeitsdaten und fand nur geringe Unterschiede, so daß er schloß, daß die Dissoziationswärme bei gleichem Molekulargewicht und gleichen Ionen in Lösung vom Lösungsmittel unabhängig ist.

Wahrscheinlich ist nur eine sehr geringe Wärmemenge erforderlich, um gasförmigen Wasserstoff in $H^{\cdot}$-Ion zu verwandeln. Ostwald setzt diese Wärme gleich Null und hat aus thermochemischen Daten berechnet, wie groß die Bildungswärme der Ionen aus den Elementen oder Atomgruppen (pro Aequivalent) ist. Die Summe dieser Bildungswärmen ergibt sofort die Wärmetönung bei der Bildung des gelösten Salzes aus den Elementen.

(Tabelle siehe nächste Seite.)

Also ist die Wärmetönung für die Reaktion (K, Cl, aq.) = + 61,8 + 39,1 = 100,9 Kal., während S. 1109 101,2 Kal. berechnet sind; für (Ag, J, aq.) ergibt sich + 13,1 — 25,3 = —12,2 während die Bildungswärme des festen Salzes (S. 1110) zu + 15,03, die Lösungswärme S. 1114 zu — 26,44 angegeben ist, woraus sich — 11,4 Kal. berechnen.

Die Tabelle erlaubt also nur Ueberschlagsrechnungen.

6. Thermochemie kolloidaler Körper. Ueber die Wärmetönungen in kolloidalen Systemen liegen verstreute Messungen vor, die erst in letzter Zeit hauptsächlich durch H. Freundlich (Kapillarchemie, Leipzig 1909) in ein System gebracht worden sind (vgl. auch den Artikel „Adsorption“).

Die Adsorption von Gasen durch amorphe Körper mit großer Oberfläche nimmt mit sinkender Temperatur zu, also muß der Vor-

		Kal.
$H^{\cdot}$		0
$Li^{\cdot}$	+	62,8
$Na^{\cdot}$	+	57,3
$K^{\cdot}$	+	61,8
$Rb^{\cdot}$	+	62,5
$NH_4^{\cdot}$	+	32,7
$Ag^{\cdot}$	—	25,3
$Hg^{\cdot}$	+	19,8
$Tl^{\cdot}$	+	1,7
Cl'	+	39,1
Br'	+	28,2
J'	+	13,1
ClO_3'	-	23,4
ClO_4'		38,7
BrO_3'	+	11,2
JO_3'	+	55,8
NO_3'	+	48,9
NO_2'	+	27,0
OH'	+	54,4
N_3'	—	66,1

		Kal. pro Aequivalent
$Zn^{\cdot\cdot}$		17,5
$Cd^{\cdot\cdot}$	-	0,2
$Pb^{\cdot\cdot}$	+	0,2
$Cu^{\cdot\cdot}$	—	8,0
$Mg^{\cdot\cdot}$	+	54,4
$Ca^{\cdot\cdot}$	+	54,7
$Sr^{\cdot\cdot}$	+	59,8
$Fe^{\cdot\cdot}$	+	11,1
$Co^{\cdot\cdot}$	+	8,5
$Ni^{\cdot\cdot}$	+	8,0
$Mn^{\cdot\cdot}$	+	25,1
$Sn^{\cdot\cdot}$	+	3,3
CO_3''	+	80,4
SO_4''	+	107,0
S''	+	6,3
SeO_4''	+	72,4
S_2O_3''	+	69,3

		Kal. pro Aequivalent
$Al^{\cdot\cdot\cdot}$	+	40,3
$Fe^{\cdot\cdot\cdot}$	—	3,1
AsO_4'''	+	71,6
PO_4'''	+	99,1

gang mit einer Wärmeentwickelung verbunden sein. Das ist der Fall. Man hat hauptsächlich mit Kohle wie Kokosnuß- oder gewöhnlicher Holzkohle gearbeitet, sogar bei der Temperatur der flüssigen Luft (Dewar). Wie bei der Lösungswärme muß man die erste, die integrale und die differentiale Adsorptionswärme unterscheiden. Läßt man die adsorbierte Gasmenge ungefähr konstant bleiben und ändert nur den zugehörigen Gasdruck, so kann man die Adsorptionswärme (in diesem Falle die „isosterische" genannt, die etwa der Verdampfungswärme entspricht), berechnen, wenn man die Veränderlichkeit der Adsorption mit der Temperatur kennt und weiß, wie das Gleichgewicht von dem Gasdruck abhängt. Es gilt wie bei der Verdampfung:

$$q = RT^2 \frac{d \ln p}{dT}.$$

Titoff maß kürzlich (Zeitschr. f. phys. Chem. 74, 658; 1910) diese Wärmetönungen für Kohle und Stickstoff, Kohlensäure und Ammoniak sehr genau bei 0° und fand eine sehr gute Uebereinstimmung mit der Formel.

So wurde pro

ccm N_2 gef. 0,21 g-kal., ber. 0,17
„ CO_2 „ 0,29 „ „ 0,29
„ NH_3 „ 0,354 „ „ 0,345 bis 0,365

je nach dem Stück der Isotherme.

Die folgenden Angaben beziehen sich auf 1 Mol Gas und 0°.

Kohle: Luft 2,4 Kal. Kohlensäure 7,3, Ammoniak 8,1, Schwefeldioxyd 10,9, Chlormethyl 10,7 Kal.

Meerschaum: Schwefeldioxyd 6,7, Chlormethyl 7,4, Ammoniak je nach den Versuchsbedingungen 7,6 bis 11,3 Kal.

Stets ist die erste Wärmetönung bei weitem größer als die für weitere Adsorption.

Die Wärmetönung für die Adsorption in Lösungen und an der Grenzfläche zweier Flüssigkeiten ist noch nie gemessen worden, doch muß sie dasselbe Vorzeichen haben, wie die eben besprochene Adsorptionswärme.

Die öfter gemessene Benetzungswärme ist als integrale Wärmetönung einer theoretischen Diskussion kaum zugänglich. Sie ist der Größe der Berührungsfläche proportional, also eine individuelle Größe. Man fand z. B. für Wasser und Holzkohle 7,4 g-kal., für Ruß und Paraffinöl 1,7 g-kal., für Wasser und Tonerde 2,8 g-kal. pro Gramm Adsorbens. Bei 4° kehrt sich für Wasser das Vorzeichen der Benetzungswärme um; Wasser unter 4° kühlt sich beim Verdichten ab, und umgekehrt. Daß die Adsorption im Grunde eine Kompression ist, leuchtet ein.

Beim Koagulieren von reversiblen Kolloiden tritt eine nicht unerhebliche Wärmeentwickelung auf, beim Lösen Wärmebindung; bei Kieselsäuresol wurden ca. 10 g-kal. pro Gramm beobachtet; bei anderen Kolloiden war der Wärmeumsatz geringer. Für irreversible Kolloide widersprechen sich die Angaben vielfach. Fällt man zwei entgegengesetzt geladene Kolloide durch einander aus, so hat man Wärmeentwickelung beobachtet, ohne daß die Niederschlagsmenge der Wärmeentwickelung proportional war.

Beim Quellen wird stets Wärme entwickelt; dabei ist zu beachten, daß die Wärmetönung aus zwei entgegengerichteten Größen besteht, der positiven Quellungs- und der negativen „Auflösungs"-Wärme. Am genausten ist die Quellung von Stärke kalorimetrisch verfolgt worden. Für den ersten Anteil Wasser ist die Wärmetönung am größten; da dieser aus dem Dampfraum aufgenommen werden kann, ist die Quellungswärme von der Adsorptionswärme prinzipiell nicht verschieden.

7. Thermochemie organischer Körper. Nur in Ausnahmefällen verlaufen die Um-

setzungen organischer Körper rasch und eindeutig, d. h. ohne Nebenreaktionen. Darum ist die Zahl der direkt kalorimetrisch verfolgten Reaktionen äußerst gering. Fast immer muß man seine Zuflucht zu der Verbrennungsbombe nehmen, in der die Stoffe mit Hilfe von komprimiertem Sauerstoff vollständig verbrannt werden; denn diese Verbrennung ist die einzige allen organischen Körpern gemeinsame, vollständig verlaufende Reaktion.

Die Thermochemie der organischen Verbindungen beschränkt sich also fast ganz auf die Bestimmung der Verbrennungswärmen und die Diskussion der aus diesen Daten zu ziehenden Schlüsse.

Apparatur. Flüchtige Körper und Dämpfe kann man bei konstantem Druck (Atmosphärendruck) im Sauerstoffstrom verbrennen. Thomsen konstruierte einen „Universalbrenner", mit dem er auch weniger flüchtige Substanzen verbrannte; doch hat es sich herausgestellt, daß die Vorrichtung, sobald man die Verdampfung durch Erwärmung erleichtern muß, zu hohe Werte für die Verbrennungswärme liefert. Der „Universalbrenner" ist daher, ebenso wie ähnliche Vorrichtungen anderer Thermochemiker, fast allgemein verlassen worden, und so gut wie alle Verbrennungswärmen werden zurzeit mit der „Verbrennungsbombe" bestimmt. Die Idee, auch die schwerst flüchtigen Stoffe im verschlossenen Gefäß mit Hilfe von komprimiertem Sauerstoff zu verbrennen, stammt von Berthelot (1884), der als der Schöpfer der organischen Thermochemie anzusehen ist. Früher hatte man solche Verbrennungen mit $KClO_3$ gemacht, was viele Fehlerquellen einschloß. Die zahlreichsten und besten Bestimmungen mit der Bombe hat unzweifelhaft der Leipziger Thermochemiker Stohmann ausgeführt, dessen Daten weiterhin nach Möglichkeit benutzt werden sollen. Seine Untersuchungen sind in der letzten Zeit von verschiedenen Forschern wieder aufgenommen.

Die Bomben sind fest verschraubbare, etwa 300 ccm fassende Gefäße aus Nickelstahl, die innen mit einer säurefesten Substanz (Platin, Emaille, neuerdings auch gewisse Legierungen) ausgekleidet sind, ein Ventil mit Füllvorrichtung für den Sauerstoff enthalten und im Deckel eine Vorrichtung zur elektrischen Zündung tragen. Unter den Stromzuführungen ist ein Schälchen aus Platin, seltener Ton oder Quarz angebracht zur Aufnahme der Substanz. Sauerstoff wird bis zum Druck von 25 bis 30 Atmosphären eingelassen. Die Verbrennung wird durch einen glühenden, zu geschmolzenem Fe_3O_4 verbrennenden, dünnen Eisendraht oder durch ein die Substanz berührendes Baumwollfädchen eingeleitet, das an einem elektrisch zum Glühen erhitzten Platindraht befestigt wird. Ist eine Substanz sehr schwer brennbar, so gibt man eine kleine Menge einer leicht zündenden Hilfssubstanz zu. Um das Verdampfen und unvollständige Verbrennen flüchtiger Körper zu verhindern, muß man sie vor der Zündung schützen, was auf recht verschiedenem Wege geschehen kann. Die Eichung der Apparatur geschieht am besten elektrisch oder durch Verbrennung von Rohrzucker und Benzoesäure, deren Verbrennungswärmen mit Hilfe einer sehr sorgfältig elektrisch geeichten Apparatur bestimmt sind (Phys. Techn. Reichsanstalt und E. Fischer-Wrede). An Korrekturen sind außer der (nach genauem Verfahren auszuführenden!) für den Wärmeaustausch mit der Umgebung solche für die Zündung und für die gebildete Salpetersäurelösung (s. unter Thermochemie der Elemente) anzubringen. Damit im Interesse der Eindeutigkeit bei der Verbrennung nur flüssiges Wasser entsteht und bei der Untersuchung von Cl- und S-haltigen Körpern die entstehenden Säuren sich lösen können, füllt man einige Kubikzentimeter Wasser in die Bombe, so daß der Bombenraum stets mit Wasserdampf gesättigt ist. Untersucht man chlorhaltige Körper, so ist durch Anwesenheit einer reduzierenden Substanz wie As_2O_3 dafür zu sorgen, daß alles Chlor zu Salzsäure reduziert wird. Die Verbrennungsprodukte sind also stets die gleichen: gasförmiges CO_2, flüssiges H_2O, gel. HCl, H_2SO_4-Lösung, gasförmiges N_2, Bromdampf, festes Jod. Da man mit einiger Uebung, guter Apparatur und sehr sorgfältiger Arbeit 1 Promill Genauigkeit, unter Umständen sogar etwas mehr erreichen kann, sollten die Schlüsse aus den Verbrennungswärmen zu den sichersten der Thermochemie gehören. Dem ist aber nicht so; denn häufig sind die untersuchten organischen Körper unscharf definiert, ferner betragen die gesuchten Wärmetönungen wie Umwandlungs- oder Substitutionswärmen selten mehr als 1 Prozent, oft nur einige Promill der Verbrennungswärmen. Die Verbrennung ist gegenüber der feinen intramolekularen Umlagerung ein brutaler, zu viel Wärme produzierender Prozeß, ferner wird bei den Umwandlungen nur ein kleiner Teil des Moleküls verändert; bei der Verbrennung aber das ganze; man schleppt also bei der Bestimmung der Verbrennungswärme einen großen Ballast mit, der selbst bei genauem Arbeiten bewirkt, daß man sich leicht in der Nähe der Fehlergrenze bewegt. Ein Beispiel mag das erläutern. Will man wissen, wie groß die Umwandlungswärme von Zimtsäure (trans-) in Allozimtsäure (cis-) ist, so besteht die Umlagerung in der Wanderung der beiden Gruppen COOH und H; bei der Verbrennung

aber reagiert nicht nur der beiden Isomeren gemeinsame große Rest, $C_6H_5 . C_2H$, mit, sondern es muß der ganze Molekülverband zerstört und jedes Atom zu seinem stabilsten Oxyd verbrannt werden! So kommt es, daß die Umwandlungswärme als die Differenz der beiden großen Verbrennungswärmen (1041,4 und 1048,1) nicht genauer als auf etwa 15% zu erhalten ist; und dieser Fall ist noch nicht einmal besonders ungünstig. In einigen wenigen Fällen ist es möglich gewesen die Umwandlungswärme auf einem weniger ungünstigen Wege zu erhalten, wo man nämlich die beiden Isomeren oder allotropen Körper auf mildere Weise in einen identischen Zustand überführen konnte; z. B. wenn die Schmelzen identisch sind, wie bei allotropen Modifikationen, durch Bestimmung der Erstarrungswärmen, oder bei ungesättigten Kohlenwasserstoffen durch Addition von Brom und Bestimmung dieser Wärmetönung. — Bei der Kleinheit der in Frage kommenden Differenzen der Verbrennungswärme muß man sehr vorsichtig sein, wenn man die Daten verschiedener Forscher kombiniert. Selbst bei gut definierten Verbindungen differieren die Werte oft um mehrere Promill und mehr, was seine Ursache in der verschiedenen Eichung der Apparatur haben dürfte. Auf die sichere Bestimmung des „Kapazitätsfaktors“, des Wasserwertes, kann nicht genug Mühe verwendet werden.

Es sei besonders hervorgehoben, daß man nur aus den molekularen Verbrennungswärmen Schlüsse ziehen kann, nicht aus den spezifischen, ausgenommen etwa, man vergleicht isomere Körper miteinander, obwohl sich auch da die Beziehung auf ein Mol empfiehlt. Der Unterschied zwischen der Verbrennungswärme bei konstantem Druck und bei konstantem Volumen ist schon S. 1100 (Abschnitt 2a) behandelt worden. Im folgenden wird immer mit der molekularen Verbrennungswärme bei konstantem Druck gerechnet, auf die genauen Molekulargewichte bezogen und als „V.-W.“ abgekürzt.

Man glaubte anfangs, daß die V.-Wen. der Verbindungen gleich der Summe der V.-Wen. der Komponenten wären, d. h. daß die Bildungswärmen gleich Null wären, doch hielt die Ansicht vor halbwegs genauen Messungen nicht stand. Auch die später geäußerte Ansicht, daß der Eintritt von vollständig oxydierten Gruppen wie H_2O oder CO_2 in ein Molekül die V.-W. nicht ändert, erweist sich nur als eine ganz angenäherte Rechenregel, die am Schluß des Abschnitts kurz behandelt werden soll (S. 1127). Vielmehr ist die V.-W., so viel additive Züge auch bemerkbar sind, eine deutlich k o n s t i t u t i v e Eigenschaft. Sie kann also wie so viele physikalisch-chemische Größen zur Konstitutionsbestimmung dienen, sehr genaues Arbeiten und Reinheit des Materials vorausgesetzt.

Eine genaue Vorausberechnung der V.-W. ist daher — trotz der zahlreichen Versuche in der Richtung — nur möglich unter peinlicher Berücksichtigung der Konstitution und nur, wenn man von ähnlich gebauten Körpern ausgeht, nicht von den Elementen C und H.

Eine derart beschränkte Berechnung ist bis zu einem gewissen Grade möglich, weil für homologe (stickstofffreie) Verbindungen die einfache Regel gilt, daß die V.-W. pro CH_2-Gruppe um nahezu die gleiche Größe ansteigt, nämlich um 153 bis 158 Kal. Ferner entspricht der Eintritt bestimmter Gruppen wie OH, C_6H_5, C_3H_5, OCH_3, COOH, NH_2 anstelle von H immer ungefähr einem konstanten Inkrement, falls sich der Aggregatzustand durch die Substitution nicht ändert. Anderenfalls muß man bei festen Körpern die Schmelzwärme (genauer die wenig verschiedene Erstarrungswärme) zur V.-W. addieren oder in Abzug bringen. Säuren und Ester gelten dabei n i c h t als homolog; vielmehr hat ein Ester eine um etwa 17 bis 19 Kal. größere V.-W. als eine Säure von gleicher Zusammensetzung und gleichem Aggregatzustande, falls die Säure einbasisch ist; für zweibasische verdoppelt sich die Differenz usf. So ist die V.-W. von festem Dimethyloxalat 402,3 Kal., für die ebenfalls feste Methylmalonsäure 365,4 Kal., also um 2 . 18,5 Kal. kleiner.

Das Inkrement für den Eintritt einer Gruppe anstelle eines H-Atoms nennt S t o h m a n n den „Wärmewert“ der Gruppe. So ist der Wärmewert einer Phenylgruppe 720 bis 730 Kal., der einer Allylgruppe etwa 430 Kal. usf. Handelt es sich um ungesättigte Verbindungen oder um solche, die C=O-Gruppen enthalten, so muß man bei der Rechnung sehr vorsichtig zu Werke gehen (s. unten). Ueberhaupt sind die Wärmewerte nicht so konstant, wie man wohl früher, namentlich nach S t o h m a n n s Arbeiten, annahm. Man darf nicht von aliphatischen Verbindungen auf zyklische schließen, denn meist erniedrigt R i n g b i l d u n g die V.-W., ohne daß man einen konstanten Betrag dafür angeben kann. Denn der Wert ist für jede R i n g a r t verschieden und hängt außerdem sehr von der Lage der D o p p e l b i l d u n g e n ab. Ceteris paribus hat eine Verbindung mit Fünfring die kleinste V.-W., wie auch die Spannungstheorie (v o n B a e y e r) verlangt; ein Sechsring bedingt einen wenig größeren Energieinhalt, ein Siebenring einen noch größeren, denn folgt ein Drei- und ein Vierring. Eine Verbindung mit einer Doppelbindung hat eine um etwa 8 Kal. kleinere V.-W. als das Isomere mit einem Dreiring

(beispielsweise Propylen und Zyklopropan); gegen die isomere Verbindung mit Fünfring ist die V.-W. der nicht zyklischen ungesättigten Verbindung um 10 Kal. größer; die Differenz kann fast bis auf das Doppelte steigen, je nach der Konstitution, d. h. hauptsächlich der Lage der Doppelbindungen. — Schon früher waren einzelne Fälle bekannt, wo eine Verbindung mit zwei benachbarten oder „konjugierten" Doppelbindungen (—C = C   C — C — oder — C — O . C = C —) eine kleinere V.-W. besitzt als eine isomere, bei welcher die Doppelbindungen weiter auseinander liegen. Dieses Verhalten von Isomeren war von Thiele auf Grund seiner Theorie der Partialvalenzen vorausgesagt worden. Die experimentellen Belege dafür sind in letzter Zeit von Auwers und Roth systematisch vermehrt worden. Man kann ganz allgemein sagen, daß „Konjugation" der Doppelbindungen den Energieinhalt deutlich herabsetzt, Aufhebung der Konjugation ihn erhöht; ein konstanter Betrag läßt sich aber auch hierfür nicht angeben. Wird ein mehrfach ungesättigter Körper reduziert, d. h. tritt die Gruppe H_2 anstelle einer Doppelbindung, so ist der thermische Effekt also ein ganz anderer bei Körpern mit konjugierten Doppelbindungen oder mit nicht konjugierten; diese Verschiedenheit, die eine einheitliche Berechnung unmöglich macht, ist für die Konstitutionsbestimmung von großer Bedeutung. Ferner scheint die Energie erhöhende Wirkung einer semizyklischen Doppelbindung sicher gestellt zu sein, obwohl auch hier kein konstanter Betrag angegeben werden kann. Der Einfluß anderer Konstitutionsnüancen wie „gestörter" oder „gekreuzter" Konjugation ist noch nicht genügend untersucht, überschreitet vielleicht auch bei Verbindungen mit größerem Molekül, des „Ballastes" wegen, kaum die Fehlergrenzen.

Beispiele: Wie verschieden die V.-Wen. von Isomeren sein können, zeigt z. B. die folgende Zusammenstellung, die eine Reihe von einheitlich untersuchten Ketonen (Roth und Mitarbeiter) enthält.

Ketone $C_{10}H_{14}O$; flüssig

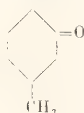
aliphatisch — nicht konjugiert: 1439 aus dem Wert für $C_7H_{14}O$ berechnet.

hydroaromatisch

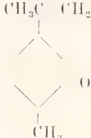
Karvenon konjugiert 1409



Pulegon semizyklisch-konjugiert 1414



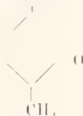
Dihydrokarvon — nicht konjugiert 1416



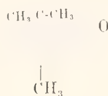
Isopulegon — nicht konjugiert 1418



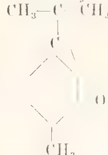
Thujon Dreiring 1432



flüssiger Kampfer Fünfring mit obigen fast identische V.-W.



Karon Dreiring fast die gleiche V.-W. wie Thujon



Stereoisomerie. Kommt eine Verbindung als „cis" und „trans"-Form in zwei stereoisomeren Modifikationen vor, so haben diese verschiedene V.-Wen. Die chemisch labilere, unter Energieaufnahme (Bildung in der Wärme oder durch Bestrahlung) entstehende cis-Form muß die größere V.-W. besitzen, wie es tatsächlich für eine große Zahl von Körpern, namentlich von Säuren und ihren Derivaten festgestellt worden ist (s. nächste Tabelle).

Verbrennungswärme und elektrolytische Dissoziation. Stohmann stellte an der Hand zahlreicher Daten den Satz auf, daß bei isomeren Säuren V.-W. und Dissoziationskonstante gleichzeitig zu- und abnehmen, und hat die leichter zu messende Dissoziationskonstante zur Kontrolle seiner thermischen Messungen verwendet. Für Stereoisomere kann man den Satz dahin erweitern, daß die cis-Form stets die größere V.-W. und die

größere Dissoziationskonstante, meist auch den tieferen Schmelzpunkt und die größere Löslichkeit hat, wofür Roth und Stoermer viel Material beigebracht haben. Aus dem Satz folgt weiter, daß Säuren mit konjugierten Doppelbindungen schwächer sind als solche ohne Konjugation. Aehnliches scheint für Basen zu gelten. Die von selbst verlaufenden Umlagerungen von isomeren organischen Elektrolyten, bei denen also Arbeit geleistet werden kann, gehen folglich in der Richtung vor sich, daß Körper mit kleinerer freier Ionisationsenergie entstehen ($A = RT \ln K$; vgl. Abschnitt 2b. Derick).

Zahlenbeispiele

Substanz	V.-W.	Umwandl.-W.	Diss.-Konst. (meist bei 25°)
Fumarsäure	320,3	6,1	$0,1 . 10^{-2}$
Maleinsäure	326,4		$1,3 . 10^{-2}$
Zimtsäure	1041,4	6,7	$3,8 . 10^{-5}$
Allozimtsäure	1048,1		$14,1 . 10^{-5}$
p-Oxyzimtsäure	992,4	5,1	$2,3 . 10^{-5}$
Allo-p-Oxyzimtsäure	997,5		$8,4 . 10^{-5}$
Methylkumarsäure	1162,4	6,2	$2,1 . 10^{-5}$
Methylkumarinsäure	1168,6		$5,4 . 10^{-5}$
Aethylkumarinsäure	1317,9	6,5	$2,1 . 10^{-5}$
Aethylkumarinsäure	1324,4		$4,5 . 10^{-5}$
$\Delta^{2,6}$-Dihydroterephtalsäure	836,4	6,5	$17 . 10^{-5}$
$\Delta^{2,5}$-Dihydroterephtalsäure	842,9		$15 . 10^{-5}$
Tiglinsäure	627,0	8,4	$1,0 . 10^{-5}$
Angelikasäure	635,4		$5,0 . 10^{-5}$
o-Toluidin	965,5	9,3	$11 . 10^{-10}$
Methylanilin	974,8		$74 . 10^{-10}$
p-Phenylendiamin	844,5	36?	$3,1 . 10^{-10}$
Phenylhydrazin	880,4		ca. $16 . 10^{-10}$

Zusammenstellung von Verbrennungs- und Bildungswärmen wichtiger organischer Verbindungen. Die Bildungswärmen sind mit Hilfe der Werte $(C,O_2)_{\text{gasf.}} = +94{,}25$, $(H_2,O)_{\text{fl.}} = +68{,}44$, $(H,Cl)_{\text{gel.}} = +39{,}35$ sowie $(S,{}^3/_2O_2,\ H_2O)_{\text{gel.}} = +142$ Kal. berechnet und beziehen sich auf konstanten Druck. Ist die Verbrennung der schwefelhaltigen Körper nicht mit komprimiertem Sauerstoff ausgeführt, d. h. ist bei der Verbrennung gasf. SO_2 entstanden, so ist die Wärmetönung (S,O_2) gasf. $= +71$ Kal. in Rechnung gesetzt. Hier wie in der folgenden Tabelle sind nach chemischer Ausdrucksweise die entwickelten Kal. als positiv, die aufgenommenen als negativ gerechnet worden. Der Rechnung ist Graphit und rhombischer Schwefel zugrunde gelegt; will man sich auf dem Papier den Luxus leisten, die organischen Verbindungen aus Diamant entstanden zu denken, so wird (C,O_2) gasf. $= +94{,}4$ Kal., d. h. bei exothermen Körpern wird die Bildungswärme pro Kohlenstoffatom um 0,15 Kal. größer, bei endothermen wird sie — absolut gerechnet — um ebensoviel kleiner; ein Unterschied ist also kaum bemerkbar.

Beispiel: Die V.-W. von Aethan ist $+ 372{,}0$, diejenige von 2 Molen Graphit $+ 188{,}5$, die von 3 Molen Wasserstoff $+ 205{,}4$ (Summe $+ 393{,}9$), also ist die Bildungswärme $393{,}9 - 372{,}0 = +21{,}9$ Kal.; für Diamant erhält man $394{,}2 - 372{,}0$, also $+ 22{,}2$ Kal. Die V.-W. von Acetylen ist $+ 312{,}5$, diejenige von 2 $C_{\text{Gr.}}$ wieder $+ 188{,}5$, die von 1 Mol Wasserstoff $+ 68{,}4$; die V.-W. der Komponenten ist also $+ 256{,}9$; die Bildungswärme also 256,9 312,5 55,6 Kal. Rechnet man mit der V.-W. von Diamant, so ist die Bildungswärme $2 \times 94{,}4 + 1 \times 68{,}4 - 312{,}5 = -55{,}3$ Kal. Die nicht ganz sicheren Daten sind in der Tabelle ohne Dezimalen angegeben oder abgerundet. Die Werte für die Bildungswärmen weichen vielfach von früher angegebenen ab, weil die V.-Wen. der Elemente, speziell des Kohlenstoffs, früher anders angenommen worden sind und die Bildungswärmen als Differenzen zweier nicht ganz sicherer Zahlen, die sich nur wenig unterscheiden, sehr empfindliche Zahlengrößen sind; auch die Benutzung der genauen Molekulargewichte macht sich bei den hochmolekularen Verbindungen geltend.

Siehe die Tabelle auf der nächsten Seite.

Die Bildung von Benzol aus Acetylen ist also mit einer erheblichen Wärmeentwickelung ($3 . 312{,}5 - 783 = +154$ Kal.) verbunden. Benzol als neutral konjugiertes System ist relativ stabil. Auffällig ist der geringe Unterschied in den Bildungswärmen von Benzol und Naphtalin gegen ihr erstes Hydrierungsprodukt, während die Bildungswärme sonst durch Aufnahme von H_2 erheblich ansteigt. Die Ursache der geringen Differenzen ist der Unterschied zwischen neutral konjugierten Systemen und solchen mit freien Partialvalenzen!

Substanz	Formel	Aggr.-Zust.	V.-W.	Bildungsw. aus den Elementen
	Kohlenwasserstoffe (vgl. auch 3a)			
Methan	CH_4	gasförmig	212	19
Aethan	C_2H_6	,,	372	+ 22
Aethylen	C_2H_4	,,	341	− 10
Acetylen	C_2H_2	,,	312,5	− 55,5
Propan	C_3H_8	,,	529	+ 27,5
Propylen	C_3H_6	,,	490,5	− 8,5
Trimethylen	C_3H_6	,,	504	− 16
n-Hexan	C_6H_{14}	flüssig	992,5	+ 52
Zyklohexan	C_6H_{12}	,,	943	+ 33
Tetrahydrobenzol	C_6H_{10}	,,	893,5	+ 14,5
Dihydrobenzol	C_6H_8	,,	849	− 9,5
Benzol	C_6H_6	,,	783	− 12
Toluol	C_7H_8	,,	935	− 1,5
o-, m-, p-Xylol	C_8H_{10}	,,	1089	+ 7
Styrol	C_8H_8	,,	1047	− 19
Limonen	$C_{10}H_{16}$	,,	1474	+ 16
Pinen	$C_{10}H_{16}$	,,	1483	+ 7
Δ_2-Dihydronaphtalin	$C_{10}H_{10}$	fest	1300	15
Naphtalin	$C_{10}H_8$	,,	1235	− 18,5

Substanz	Formel	Aggr.-Zust.	V.-W.	Bildungsw. aus den Elementen
	Alkohole und Phenole.			
Methylalkohol	$CH_3.OH$	flüssig	170,5	+ 60,5
Aethylalkohol	$C_2H_5.OH$	,,	326,5	+ 67,5
Glyzerin	$C_3H_5(OH)_3$	,,	397,5	+ 159
Mannit	$C_6H_8(OH)_6$	fest	728	+ 316,5
Phenol	$C_6H_5.OH$	,,	733	+ 38
α-Naphtol	$C_{10}H_7.OH$	,,	1189	+ 27,5
β-Naphtol	$C_{10}H_7.OH$	,,	1191	+ 25,5

Die primären Alkohole haben etwas größere V.-Wen. als die sekundären und tertiären.

Substanz	Formel	Aggr.-Zust.	V.-W.	Bildungsw. aus den Elementen
	Aether und Phenoläther.			
Aethylenoxyd	C_2H_4O	flüssig	302,5	+ 23,0
Aethyläther	$(C_2H_5)_2O$	,,	652	+ 6,7
Anisol	$C_6H_5.OCH_3$	,,	906	+ 27,5
Phenetol	$C_6H_5.OC_2H_5$	,,	1058	+ 38
Eugenol[1])	$C_{10}H_{12}O_2$	,,	1288	+ 65
i-Eugenol[2])	$C_{10}H_{12}O_2$	,,	1279	+ 74
	Aldehyde.			
Acetaldehyd	C_2H_4O	,,	279	+ 49,5
Propionaldehyd	C_3H_6O	,,	435	+ 53
Benzaldehyd	C_7H_6O	,,	842	+ 23
Zimtaldehyd	C_9H_8O	,,	1113,5	+ 8,5
	Ketone s. auch S. 1121.			
Aceton	C_3H_6O	flüssig	427	+ 61
Mesityloxyd[2])	$C_6H_{10}O$	,,	847	+ 60,5
Allylaceton[1])	$C_6H_{10}O$	,,	858	+ 49,5
Chinon	$C_6H_4O_2$	fest	659	+ 43,5
Benzophenon	$C_{13}H_{10}O$	,,	1559	+ 7,5

Aldehyde haben eine größere V.-W. als die entsprechenden Ketone.

Substanz	Formel	Aggr.-Zust.	V.-W.	Bildungsw. aus den Elementen
	Kohlehydrate.			
Traubenzucker	$C_6H_{12}O_6$	fest	674	+ 302
Fruchtzucker	$C_6H_{12}O_6$	,,	676	+ 300
Rohrzucker	$C_{12}H_{22}O_{11}$	,,	1352,3	+ 531,5
Milchzucker	$C_{12}H_{22}O_{11}$	,,	1352	+ 532
Maltose	$C_{12}H_{22}O_{11}$	,,	1351,5	+ 532,5

Aus den V.-Wen. geht hervor, daß die Inversion des Rohrzuckers mit einer sehr geringen Wärmeentwickelung verbunden ist.

[1]) Nicht konjugiert. [2]) Konjugiert.

Substanz	Formel	Aggr.-Zust.	V.-W.	Bildungsw. aus den Elementen
	Aliphatische Säuren.	Vgl. auch S. 1129.		
Ameisensäure	CH_2O_2	flüssig	62,7	+ 100
Essigsäure	$C_2H_4O_2$	„	210	+ 115,5
Propionsäure	$C_3H_6O_2$	„	367,5	+ 120,5
Buttersäure	$C_4H_8O_2$	„	524,8	+ 130,0
Krotonsäure	$C_4H_6O_2$	„	479	+ 103,0
Stearinsäure	$C_{18}H_{36}O_2$	fest	2715	+ 213,5
Oelsäure	$C_{18}H_{34}O_2$	flüssig	2685	+ 175
Oxalsäure	$C_2H_2O_4$	fest	60,3	+ 196,7
Malonsäure	$C_3H_4O_4$	„	207,5	+ 212,0
Bernsteinsäure	$C_4H_6O_4$	„	357	+ 225,5
Methylmalonsäure	$C_4H_6O_4$	„	362,5	+ 220
Citrakonsäure	$C_5H_6O_4$	„	488	+ 188,5
Mesakonsäure	$C_5H_6O_4$	„	477	+ 199,5
Citronensäure	$C_6H_8O_7$	„	475,0	364,5
	Aromatische Säuren.	Vgl. auch S. 1129.		
Benzoesäure	$C_7H_6O_2$	fest	772,3	+ 92,8
Salizylsäure	$C_7H_6O_3$	„	727,5	+ 137,5
m-Oxybenzoesäure	$C_7H_6O_3$	„	727	+ 138
p-Oxybenzoesäure	$C_7H_6O_3$	„	726	+ 139
Phenylessigsäure	$C_8H_8O_2$	„	931	+ 97
Toluylsäuren	$C_8H_8O_2$	„	926	+ 102
o-Phthalsäure	$C_8H_6O_4$	„	773	+ 186,5
m-Phthalsäure	$C_8H_6O_4$	„	769	+ 190,5
p-Phthalsäure	$C_8H_6O_4$	„	771	+ 188,5
	Hydroaromatische Säuren.	Vgl. auch S. 1129.		
Trimethylenkarbonsäure	$C_4H_6O_2$	flüssig	480	+ 102,5
Hexahydroterephtalsäure	$C_8H_{12}O_4$	fest	930	+ 234,5
Δ_1-Tetrahydroterephtalsäure	$C_8H_{10}O_4$	„	883	+ 213
Δ_2-Tetrahydrophtalsäure	$C_8H_{10}O_4$	„	882	+ 214
		Ester.		
Methylacetat	$C_3H_6O_2$	flüssig	300	+ 98
Aethylacetat	$C_4H_8O_2$	„	537,5	+ 113,5
Dimethylkarbonat	$C_3H_6O_3$	„	342	+ 140
Aethylbenzoat	$C_9H_{10}O_2$	„	1100	+ 90,5
Methylsalizylat	$C_8H_8O_3$	„	899	+ 129
Zimtsäuremethylester	$C_{10}H_{10}O_2$	fest	1213	+ 71,5

Der Zerfall eines Esters in Säure und Alkohol ist, wie der Vergleich der V.-Wen. ergibt, mit einer sehr geringen Wärmeentwicklung verknüpft.

Substanz	Formel	Aggr.-Zust.	V.-W.	Bildungsw. aus den Elementen
	Stickstoffhaltige Körper.	Amine, Aminosäuren u. dgl.		
Methylamin	CH_5N	gasförmig	261,5	+ 4
Dimethylamin	C_2H_7N	„	423	+ 5
Aethylamin	C_2H_7N	flüssig	410,5	+ 17,5
Trimethylamin	C_3H_9N	„	581,5	+ 9
Anilin	C_6H_7N	„	812	+ 7
Dimethylanilin	$C_8H_{11}N$	„	1144	+ 14,5
Piperidin	$C_5H_{11}N$	„	827,5	+ 20
Pyridin	C_5H_5N	„	665	— 22,5
Formamid	CH_3ON	„	135	+ 62
Acetamid	C_2H_5ON	fest	283	+ 76,5
Benzamid	C_7H_7ON	„	848,5	+ 51
Harnstoff	CH_4ON_2	„	152	+ 79
Glykokoll	$C_2H_5O_2N$	„	233,5	+ 126
Urethan	$C_3H_7O_2N$	„	397,5	+ 125
Asparaginsäure	$C_4H_7O_4N$	„	386	+ 230,5
Hippursäure	$C_9H_9O_3N$	„	1013,5	+ 143
Harnsäure	$C_5H_4O_3N_4$	„	460,5	+ 147,5
Koffein	$C_8H_{10}O_2N_4$	„	1015	+ 81

Dem an Stickstoff gebundenen CH_2 kommt also ein anderes Inkrement zu als dem an eine Kohlenstoffkette tretenden.

Substanz	Formel	Aggr.-Zust.	V.-W.	Bildungsw. aus den Elementen
	Cyanverbindungen	und Karbylamine.		
Cyanwasserstoff	HCN	gasförmig	159	30,5
Dicyan	$(CN)_2$	„	261	— 72,5
Acetonitril	C_2H_3N	flüssig	292	— 1

Propionitril	C_3H_5N	flüssig	447	+ 7
Benzonitril	C_7H_5N	,,	866,5	35,5
Methylkarbylamin	C_2H_3N	,,	320	29
Aethylkarbylamin	C_3H_5N	,,	480	— 26
Benzylkarbylamin	C_8H_7N	,,	1047,5	54

Nitroverbindungen.

Nitromethan	CH_3O_2N	flüssig	170	27
Nitroäthan	$C_2H_5O_2N$	,,	322,5	+ 37
p-Nitrophenol	$C_6H_5O_3N$	fest	689	+ 47,5

Azoverbindungen.

Hydrazobenzol	$C_{12}H_{12}N_2$	fest	1666	— 58,5
Azobenzol	$C_{12}H_{10}N_2$	,,	1557	84
Azoxybenzol	$C_{12}H_{10}ON_2$	,,	1531	58

Halogenhaltige Verbindungen.

Chloride. Verbrennungs-Produkt: gelöster Chlorwasserstoff.

Methylchlorid	CH_3Cl	gasförmig	173	29
Chloroform	$CHCl_3$	flüssig	89,2	+ 54,5
Tetrachlorkohlenstoff	CCl_4	,,	37,3	+ 77,5
Aethylchlorid	C_2H_5Cl	gasförmig	327	+ 37,5
Benzylchlorid	C_7H_7Cl	flüssig	886,5	+ 18
Monochloressigsäure	$C_2H_3O_2Cl$	fest	171	+ 125,5
Trichloressigsäure	$C_2HO_2Cl_3$	,,	92,8	+ 145,5
Benzoylchlorid	C_7H_5OCl	flüssig	783	+ 53
o-Chlorbenzoesäure	$C_7H_5O_2Cl$	fest	734,5	101,5

Bromide. Verbrennungs-Produkt: Bromdampf.

Berechnet man die Bildungswärmen aus flüssigem Brom, so sind die Zahlen um 3,5 Kal. kleiner.

Methylbromid	CH_3Br	gasförmig	184,5	+ 12,5
Aethylbromid	C_2H_5Br	,,	341	+ 18,5

Jodide. Verbrennungs-Produkt: festes Jod.

Methyljodid	CH_3J	flüssig	194,5	+ 2,5
Methylenjodid	CH_2J_2	,,	178,5	16
Jodoform	CHJ_3	fest	162	— 33,5
Aethyljodid	C_2H_5J	flüssig	356	+ 3,5

Schwefelhaltige Verbindungen. Verbrennungs-Produkt: gelöste Schwefelsäure; bei den mit * bezeichneten Werten: SO_2-Gas.

Karbonylsulfid	COS	gasförmig	131*	34
Schwefelkohlenstoff	CS_2	flüssig Thomsen	258,5*	22
Schwefelkohlenstoff	CS_2	,, Perth.	394,5	16,5
Methylmerkaptan	CH_4S	gasförmig	299*	3
Thioharnstoff	CH_4N_2S	fest	343	30
Aethylmerkaptan	C_2H_6S	gasförmig	455,5*	9,5
Methylsulfocyanid	C_2H_3NS	flüssig	453	20
Methylsenföl	C_2H_3NS	fest	443	10
Taurin	$C_2H_7O_3NS$	,,	383	187
Aethylsulfocyanid	C_3H_5NS	flüssig	614	18
Aethylsenföl	C_3H_5NS	fest	604	8
Allylsenföl	C_4H_5NS	flüssig	732,5	42,5
Thiophen	C_4H_4S	,,	670,5	14,5

Die Daten für die schwefelhaltigen Körper sind relativ ungenau; auch die V.-Wen. des Schwefels selbst bedürfen der Nachprüfung, da die Zahlen von Berthelot und Thomsen für (S,O_2) um 2½% differieren, was bei schwefelreichen Verbindungen wie Schwefelkohlenstoff in der Bildungswärme viel ausmacht. So lassen sich aus den in der Literatur angegebenen V.-Wen. von S und CS_2 Zahlen zwischen —10 und —26 Kal. als Bildungswärme berechnen! Aus der Temperaturverschiebung des Gleichgewichtes $C + S_{2\,Dampf} \rightleftarrows CS_2$ berechnet sich die Wärmetönung zu +12,5 Kal. Für festen Schwefel ist sie negativ, weil die Verdampfungswärme des stark komplexen Schwefelmoleküls sehr groß ist. Man hat sie, ebenfalls nach der Reaktionsisochore (vgl. Formel 7 und 8) für die Umsetzung $2\,S_{fl} \rightleftarrows S_2$ Dampf zu —29 bis —30 Kal. berechnet; durch Kombination der beiden indirekt gewonnenen Wärmetönungen ergibt sich die Bildungswärme des Schwefelkohlenstoffs aus den festen Elementen zu —16 bis —18 Kal., etwa dem Mittel der oben angegebenen Zahlen entsprechend.

Physiologische Bedeutung der Verbrennungswärmen. (Vergl. auch den Artikel „Energetik der Organismen".) Rubner hat durch mühsame und genaue Versuche am lebenden Tier gezeigt, daß die im Tierkörper produzierte Wärmemenge innerhalb der Versuchsfehler der aus den oxydierten Körper- und Nahrungsstoffen berechneten physiologischen Verbrennungswärme gleich ist. Bei Fetten und Kohlehydraten sind die Endprodukte der Verdauung, wenn kein Ueberschuß an Nahrung zugeführt wird, gleich den Verbrennungsprodukten in der Bombe; bei Eiweißstoffen muß man von der mit Hilfe der Bombe bestimmten V.-W. den Brennwert des Kotes und Harns sowie die Quellungswärme des Eiweißes und die Lösungswärme des Harnstoffs abziehen. Rubner fand physiologisch

für 1 g Fett	9,42 Kal.
für 1 g Kohlehydrat	4,2 Kal.
für 1 g Eiweiß	3,96 bis 4,23 Kal.[1]

Stohmann fand mit der Bombe

für 1 g Fett	9,2 bis 9,5 Kal.
für 1 g Kohlehydrat	3,7 „ 4,2 „
für 1 g Eiweiß	5,5 „ 5,9 „

Genauere Daten nach Stohmann. Kal. bei konstanten Volumen pro g:

Butter	9,22
Speiseöle	9,43
Gewebefett	9,49
Traubenzucker	3,74
Fruchtzucker	3,76
Rohrzucker	3,96
Milchzucker	3,95
Stärke	4,18
Dextrin	4,11
Glykogen, Zellulose	4,19
Fleischfaser	5,72
Hämoglobin	5,89
Serumalbumin	5,92
Eidotter (fettfrei)	5,84
Eieralbumin	5,74
Milchkasein	5,86
Pflanzenfibrin	5,94
Kleber	5,99 (Berthelot)
Konglutin	5,48
Legumin	5,79

Atwater hat die Versuche von Rubner in großzügiger Weise und mit feinster Präzision am Menschen wiederholt. Die Versuche wurden über Tage ausgedehnt, die Kost gewechselt, Versuche mit und ohne äußere (genau als Wärme gemessene) Arbeit angestellt. Im Mittel aller Einzelversuche war die Nettoeinnahme (potentielle Energie des im Körper oxydierten Stoffes) der Nettoausgabe (als Wärme und Arbeit vom Körper abgegebene Energie) absolut gleich. Die Fehler der einzelnen Tagesversuche überschreiten selten 1%!

Hält man Tiere in einem kühlen Raum und gibt nur so viel Nahrung, daß der Bedarf an Heizmaterial gedeckt ist, so können sich die Nahrungsmittel bis zu einem gewissen Grade vertreten, und zwar fast genau im Verhältnis ihrer Nutzwerte, ihrer physiologischen V.-Wen. So vertretbare Mengen nennt Rubner „isodynam". 100 g Fett, dem besten Heizstoff unter den Nahrungsmitteln, sind isodynam:

	nach direktem Tierversuch	nach den V.-Wen. (Bombe)
Syntonin	225 g	213 g
Muskelfleisch	243 g	235 g
Traubenzucker	256 g	255 g
Rohrzucker	234 g	235 g
Stärke	232 g	229 g

Auch diese Versuche hat Atwater mit verfeinerten Methoden am Menschen wiederholt. Das Gesetz der Isodynamie gilt auch für Fette und Kohlehydrate unter sich. Beide können in nahezu demselben Maß Eiweiß sparen. Absolut ist die Isodynamie bei einseitiger Ernährung nicht.

Es ist leicht verständlich, daß die Isodynamie auch insofern keine absolute ist, als nicht alles Eiweiß der Nahrung durch andere Substanzen ersetzt werden kann. Ein gewisses Eiweißminimum (ca. 4% des gesamten Stoffwechsels) muß stets Eiweiß sein, zum Ersatz von „abgenutzten" Zellen und Zellbestandteilen. Während des Wachstums spielt der Eiweißgehalt der Nahrung natürlich eine größere Rolle als die V.-W. Im angehenden Hungerzustand, wo der Körper den Eiweißbedarf nach Möglichkeit durch Ausnutzung von Fett und Kohlehydraten ersetzt, treten diese Stoffe genau nach ihrem Kalorienwert in den Stoffwechsel ein.

Betrachtet man den Körper als Maschine und berechnet die als Muskelarbeit nutzbare Quote des Gesamtenergieumsatzes, so ergibt sich, daß die meisten Menschen rationellere Maschinen sind als z. B. eine gewöhnliche Dampfmaschine, denn man hat bis 20% Nutzungswert beobachtet[1]). Im Ruhezustand setzt ein erwachsener Mensch pro Tag etwa 2300 Kal. um; bei mittlerer Arbeit rechnet Voit 2750 Kal. als Mindestmaß der als Nahrung zuzuführenden Energie, die Zahl steigt mit der zu leistenden Arbeit stark an. Zieht man von der V.-W. eines Nahrungsmittels den Brennwert der im Kot und Harn ausgeschiedenen, nicht vollständig ausgenutzten Stoffe ab, so erhält man den Reinkalorienwert der Nahrung. In Prozenten der theoretischen V.-W. ausgedrückt nennt ihn Rubner den physiologischen

[1]) Die erste Zahl bezieht sich auf pflanzliches, die zweite auf tierisches Eiweiß. Für die menschliche Nahrung rechnet man im Mittel 4,1 Kal. pro Gramm.

[1]) Vgl. hierzu Höber, Zs. f. Elek. 16 738 1913.

Nutzeffekt. Er ist, in etwas abgerundeten Zahlen,

für Muttermilch		91,5 %
Kuhmilch (Säugling)		90,5 %
Kuhmilch (Erwachsene)		90 %
Gemischte Kost	ca.	90 %
Brot		82 %
Kleienbrot		73,5 %
Kartoffel		92 %
Fleisch		77 %
nach Atwater		
für Protein		92,5 %
Kohlehydrate		98 %
Fett		99 %

Pflanzeneiweiß wird erheblich schlechter ausgenutzt als tierisches.

Es liegt auf der Hand, daß obige Zahlen nur Näherungswerte sein können und sehr stark schwanken. Nach genauen Versuchen kann man annehmen, daß der gesamte Kohlen- und Stickstoff im Harn von Pflanzenfressern als Harnstoff und Hippursäure vorhanden ist. Aus der Zusammensetzung des Eiweißes und jener Abbauprodukte, sowie aus den V.-Wen. der drei Körper, die ja sämtlich bekannt sind, kann man eine einfache Beziehung aufstellen zwischen der Gesamtmenge C und N im Harn und der vernutzten, im Eiweiß zugeführten Energie.

Voit faßt bei seinen Rechnungen die Wärmetönung als Funktion des verbrauchten Sauerstoffes auf, dessen Menge man ja auch bei Gemischen leicht aus der Elementaranalyse berechnen kann. Die pro Gramm Substanz erforderliche Sauerstoffmenge nennt Voit die „Sauerstoffkapazität". Die pro Gramm Substanz entwickelten Kalorien sind der Sauerstoffkapazität fast genau proportional, und zwar gilt das nicht nur für die Nahrungsmittel (s. unten). Der Quotient aus Kalorien pro Gramm Substanz: Sauerstoffkapatizät ist im Mittel für

Pflanzeneiweiß	3,30
Fette und Fettsäuren	3,27
tierisches Eiweiß	3,27
Kohlehydrate	3,53

für die stickstoffhaltigen Abbauprodukte des Eiweißes 3,2 bis 3,3. Durch diese Konstanz vereinfachen sich alle Rechnungen erheblich. Da die Konstanz jenes Faktors auch für die im Harn und Darm vorhandenen Abbauprodukte des Eiweißes gilt, kommt man für Eiweiß zu demselben Quotienten, wenn man die gesamte Menge und die theoretische V.-W. einsetzt, oder wenn man die unvollständige Ausnutzung im Körper beim Gewicht und der Kalorienzahl berücksichtigt.

Konstanz des Quotienten Kal.: Sauerstoffkapazität. Bei den hochmolekularen Fettsäuren, Oelsäuren und Fetten hat die Konstanz jenes Quotienten ihren Grund darin, daß die Zusammensetzung, nach Abzug der CO_2-Gruppe, von dem Schema $(CH_2)_n$ nur wenig verschieden ist. Für die CH_2-Gruppe ist jenes Verhältnis aber, wenn wir der Bequemlichkeit halber nicht mit Gramm, sondern mit Molen rechnen, $= 156 : 48 = 3{,}25$, da die V.-W. pro CH_2 um rund 156 Kal. zunimmt. Für die Gruppe CH kann man aus den V.-Wen. von allen möglichen Verbindungen, nach Abzug der dem O äquivalenten CO_2 oder H_2O-Mengen, die V.-W. 131 ableiten, die wieder zu fast demselben Quotienten, nämlich $131 : 40 = 3{,}275$ führt. Für den Aus- oder Eintritt von H_2 ändert sich die V.-W. im Mittel um 45 Kal.; der Quotient ist also $45 : 16 = 2{,}81$, etwas kleiner als die bisherigen, aber bei größeren Molekülen infolge der Kleinheit der Werte von H_2 und der zugehörigen V.-W. gegenüber dem Molekulargewicht und der molekularen V.-W. wenig ins Gewicht fallend. Für jedes verbundene C-Atom, um das die Formel von dem Schema $(CH_2)_n$ oder $(CH)_n$ abweicht, leitet sich im Mittel der Verbrennungswert 108 ab, der den Quotienten $108 : 32 = 3{,}33$ ergibt, also wieder fast die gleiche Zahl. Stickstoff, der ja bei der Verbrennung unverbunden frei wird, wird vernachlässigt. Diese rohe Rechnung, die auf Konstitution, Schmelzwärme und Stabilität keine Rücksicht nimmt, gilt nur für Flüssigkeiten und feste Körper von nicht zu niedrigem Molekulargewicht und nicht zu großem Stickstoff- und Sauerstoffgehalt; denn es bedeutet eine grobe, an Willkür streifende Vereinfachung, wenn man in Anlehnung an die alte Weltersche Regel für jedes O-Atom die äquivalenten CO_2- oder H_2O-Moleküle von der Verbindung abstreicht und auf den Stickstoff überhaupt keine Rücksicht nimmt. Bei Gasen, kleinen Molekülen, Kohlehydraten versagt die Rechenweise; denn bei letzteren ist der Quotient 3,51 bis 3,53.

Betrachtet man obige V.-Wen. von C, H, CH und CH_2, so sieht man, daß sie nahezu additiv sind, daß aber die V.-Wen. der gebundenen C- und H-Atome von denen der elementaren deutlich abweichen. Speziell beim Kohlenstoff (94,3 Kal. für elementaren, 108 für gebundenen) rührt die Differenz sicher daher, daß bei der Verbrennung des Elements C das außerordentlich komplexe Molekül erst aufgespalten werden muß, in der V.-W. des freien C also eine erhebliche negative Dissoziationswärme steckt.

Für gebundenen Schwefel in sauerstoff- und stickstoffarmen Verbindungen kann man den Verbrennungswert 144 einsetzen, für den sich wieder fast der gleiche Quotient, nämlich $144 : 48 = 3{,}0$ ergibt, falls der S zu H_2SO_4 verbrannt wird (Bombe). Man sieht also, daß für die wichtigsten verbrennbaren Bausteine der organischen Verbindungen

der Quotient aus der V.-W. pro Atom (oder bequemer Atomgruppe) und der zur Verbrennung erforderlichen Sauerstoffmenge zufällig fast konstant, etwa gleich 3,25 bis 3,27 ist, die V.-Wen. also in den allermeisten Fällen, allerdings nur in grober Annäherung, bequem zu berechnen sind.

Sind für die Verbrennung eines Mols n Atome Sauerstoff nötig, so ist die V.-W. rund 52.2 n Kal., falls das Molekül halogenfrei, nicht zu klein, nicht sehr reich an O,S oder N oder gasförmig ist. (52.2 = 16. 3,26.)

Zahlenbeispiele.

Substanz	Formel	n	V.-W. ber.	beob.	Diff. in Proz.
n-Hexan	C_6H_{14}	19	992	992	± 0
Styrol	C_8H_8	20	1044	1047	+ 0,3
Cycloheptan	C_7H_{14}	21	1096	1010	+ 0,4
Amylalkohol	$C_5H_{12}O$	15	783	ca. 790	+ 0,9
Phenol	C_6H_6O	14	730	733	+ 0,4
Menthol	$C_{10}H_{20}O$	29	1514	1511	— 0,2
Salizylaldehyd	$C_7H_6O_2$	15	783	797	+ 1,8
Acetophenon	C_8H_8O	19	992	989	0,3
Kampher	$C_{10}H_{16}O$	27	1409	1414	+ 0,4
Valeriansäure	$C_5H_{10}O_2$	13	679	682	+ 0,4
Bernsteinsäure	$C_4H_6O_4$	7	365	357	− 2,2
Benzoesäure	$C_7H_6O_2$	15	783	772	− 1,4
Kamphersäure	$C_{10}H_{16}O_4$	24	1253	ca. 1247	− 0,5
Methylbenzoat	$C_8H_8O_2$	18	940	944	+ 0,4
Trilaurin	$C_{39}H_{74}O_6$	109	5690	5712	+ 0,4
Glykokoll	$C_2H_5O_2N$	4.5	235	234	0,4
Hippursäure	$C_9H_9O_3N$	19,5	1018	1013	0,5
Azobenzol	$C_{12}H_{10}N_2$	29	1514	1557	+ 2,8
Aethylmerkaptan	C_2H_6S	10	522	517	− 1,0
Taurin	$C_2H_7O_3NS$	7,5	392	383	— 2,3
Thiophen	C_4H_4S	13	679	671	− 1,2
Phenylsenföl	C_7H_5NS	19,5	1018	1024	+ 0,6

Man sieht aus den Abweichungen, wo die Grenzen dieser approximativen Rechenregel — denn um mehr handelt es sich nicht liegen: sobald der Sauerstoffgehalt etwa 20% erreicht, ferner bei Azoverbindungen (und bei Gasen und kleinen Molekülen); auch für Schwefelverbindungen sind die Abweichungen nicht unerheblich.

Zu Konstitutionsbestimmungen reicht diese Rechenregel kaum aus.

Literatur. **Thomsen**, *Systematische Durchführung thermochemischer Untersuchungen. Zahlenwerte und theoretische Ergebnisse. (Deutsche Uebersetzung von I. Traube.) Stuttgart 1906.* — **M. Berthelot**, *Thermochimie. Données et lois numériques. Paris 1897.* — *Die Zusammenstellungen in* **Landolt-Börnstein**, *Physikalisch-Chemische Tabellen. 4. Aufl. Berlin 1912.* — **W. Nernst**, *Theoretische Chemie. 7. Aufl. Stuttgart 1913.* — **Ostwald**, *Lehrbuch der Allgemeinen Chemie. Band 2, 1. Teil. Leipzig 189..* — **O. Sackur**, *Lehrbuch der Thermochemie und Thermodynamik. Berlin 1912. Sowie andere im Text aufgeführte Werke und Arbeiten.*

W. A. Roth.

Thermoelektrizität.

Siehe den Artikel „Wärmeelektrische Erscheinungen".

Thermometrie
einschließlich Pyrometrie.

1. Allgemeines, insbesondere Temperaturskalen. 2. Gasthermometer. 3. Flüssigkeitsthermometer. 4. Widerstandsthermometer. 5. Thermoelemente. 6. Strahlungspyrometer. 7. Verschiedene Temperaturmeßgeräte. 8. Trägheit der Thermometer. 9. Fixpunkte und Thermostaten.

1. Allgemeines, insbesondere Temperaturskalen. Die Temperatur eines Körpers kennzeichnet in quantitativer Weise den Wärmezustand, den wir qualitativ auf Grund unserer Sinneswahrnehmungen als kalt, warm, heiß, glühend usw. bezeichnen. Während die Art des Zusammenhangs zwischen Temperatur und anderen physikalischen Eigenschaften des Körpers durch strenge physikalische Gesetze bestimmt wird, ist der Maßstab, in dem die Temperatur gemessen wird, ein willkürlicher. Man legt den Maßstab in der Regel dadurch fest, daß man einen bestimmten Wert für den Unterschied zwischen der Temperatur des bei normalem Barometerstand siedenden Wassers und der Temperatur des schmelzenden Eises (Abstand der Fundamentalpunkte, Fundamentalabstand) annimmt. Der Eisschmelzpunkt wird dabei häufig als Nullpunkt der Temperaturskale bezeichnet; die tiefer liegenden Temperaturen werden

dann ebenfalls von diesem Nullpunkt aus gerechnet, aber mit einem Minuszeichen versehen. Diejenige Temperatur, bei der nach der Wärmetheorie die innere Wärmebewegung der Körper aufhört (oder nach den neuesten Anschauungen nicht mehr nach außen abgegeben werden kann), wird als absoluter Nullpunkt, die von diesem aus gerechnete Temperatur als absolute Temperatur bezeichnet, sofern der Fundamentalabstand zu 100° angenommen wird. Unserer heutigen Erkenntnis nach liegt dann der absolute Nullpunkt 273,1° unterhalb des Eisschmelzpunktes.

Die Instrumente zur Temperaturmessung bezeichnet man als Thermometer und, soweit sie zu Glühtemperaturen benutzt werden, auch als Pyrometer, die Lehre von der Temperaturmessung als Thermometrie bezw. Pyrometrie.

Zur Messung der Temperatur kann im Prinzip jede von der Temperatur abhängige Eigenschaft eines Körpers benutzt werden, sofern sie reversibel ist, d. h. sofern bei Rückkehr zu ein und derselben, beliebig angenommenen Temperatur immer wieder genau die gleiche Eigenschaft auftritt. Die wichtigsten Eigenschaften, die bisher praktisch zur Temperaturmessung Verwendung gefunden haben, sind: Wärmeausdehnung, elektrischer Widerstand, thermoelektrische Kraft, Strahlung. Daß diese Eigenschaften zur Temperaturmessung benutzt werden können, beruht, sofern man von der Strahlung zunächst absieht, darauf, daß sämtliche Körper — gleichviel ob fest, flüssig oder gasförmig —, wenn sie hinreichend lange miteinander in Berührung stehen und selbst nicht Wärme erzeugen, die gleiche Temperatur annehmen.

Teilt man die der Temperaturerhöhung vom Eisschmelzpunkt bis zum Wassersiedepunkt entsprechende Vergrößerung eines Flüssigkeits- oder Gasvolumens, Erhöhung eines Widerstandes, Vergrößerung einer Thermokraft in 100 gleiche Teile ein, so entspricht einer Temperaturerhöhung bis zu einer bestimmten Zwischentemperatur in den drei Fällen im allgemeinen eine Aenderung um eine verschiedene Anzahl von Teilen, und auch verschiedene Materialien weisen in jedem von den drei Fällen derartige Unterschiede auf. Am geringsten sind die Unterschiede zwischen der Wärmeausdehnung verschiedener, unter konstantem Druck gehaltener Gase, und zwar fallen sie um so kleiner aus, je mehr die letzteren sich dem idealen Gaszustand nähern; aber völlig zu vernachlässigen sind auch diese Unterschiede nicht. Indessen ist es mit Hilfe des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik möglich, die Temperaturanzeigen, die auf Grund der als gleichmäßig verlaufend angesehenen Wärmeausdehnung verschiedener, unter konstantem Druck stehender Gase ermittelt sind, auf eine ideale thermodynamische Temperaturskale zurückzuführen, sofern das sonstige Verhalten der Gase genügend bekannt ist. Prinzipiell ist eine solche Reduktion auch bei den anderen Methoden der Temperaturmessung möglich; praktisch ist indessen bei denselben (von der Strahlungspyrometrie wieder abgesehen) eine empirische Bestimmung der Reduktionszahlen durch Vergleichung mit einem Gasthermometer erforderlich.

Die thermodynamische Temperaturskale stimmt, dem vorhergehenden entsprechend, genau überein mit der Temperaturskale, die man mit Hilfe des die Wärmeausdehnung der Gase benutzenden Gasthermometers erhielte, wenn dasselbe mit einem völlig idealen Gas betrieben würde. Sehr nahe kommt einem solchen bei nicht zu tiefen Temperaturen der Wasserstoff, weshalb die mit dem Wasserstoffgasthermometer sich ergebende Temperaturskale im Jahre 1887 unter Festsetzung der Versuchsbedingungen als internationale Skale, und zwar im wesentlichen für Temperaturen zwischen den Fundamentalpunkten (Eisschmelzpunkt und Wassersiedepunkt) festgesetzt worden ist. In diesem Gebiet sind die Abweichungen des Wasserstoffthermometers von der thermodynamischen Skale zu vernachlässigen. Ueber die Abweichungen der anderen Gasthermometer von der thermodynamischen Skale siehe unter 2.

Erwähnt werden mag noch, daß sich die thermodynamische Skale im Prinzip auch durch den Wirkungsgrad festlegen läßt, mit dem bei einem völlig idealen Kreisprozeß die Wärme in Arbeit verwandelt wird (Lord Kelvin), wobei natürlich wieder noch der Maßstab, in der die Temperatur gemessen werden soll, festgesetzt werden muß. Zur praktischen Realisierung der thermodynamischen Skale ist diese wiederum auf den zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie aufgebaute Darstellungsweise allerdings nicht geeignet.

Was nun weiter die Temperaturmessung auf Grund der Strahlung, d. h. der Wärme- und Lichtemission der Körper anbetrifft, so ist in qualitativer Weise seit jeher bei der sichtbaren Strahlung die Stärke des Glühens (Rotglut, Weißglut) zur Beurteilung der Temperatur benutzt worden. Der quantitative Zusammenhang zwischen Temperatur und Intensität der Wärme- und Lichtstrahlung ist im allgemeinen für die verschiedenen Körper ein verschiedener. Die Strahlungsgesetze werden aber bei Ausschluß chemischer Wirkungen unabhängig von der Beschaffenheit der verwendeten Substanz, wenn man die Strahlung zugrunde

legt, die aus einer kleinen Oeffnung eines aus der Substanz gebildeten Hohlraumkörpers austritt. Ein solcher Hohlraumstrahler verhält sich genau so wie ein vollkommen schwarzer Körper, d. h. wie ein Körper, der alle auf ihn fallende Strahlung absorbiert, und wird deshalb auch schwarzer Körper (Kirchhoff, Lummer) genannt. Für die von dem schwarzen Körper emittierte schwarze Strahlung oder Hohlraumstrahlung, die in Analogie zu dem idealen Gas als ideale Strahlung bezeichnet werden kann, gelten folgende Gesetze: Das Stefan-Boltzmannsche Gesetz, nach welchem die Gesamtintensität der Strahlung proportional der 4. Potenz der absoluten Temperatur ist, das Wiensche Verschiebungsgesetz, nach welchem diejenige Wellenlänge des Spektrums, für welche die Strahlungsintensität ein Maximum ist, umgekehrt proportional der absoluten Temperatur ist, und das Wien-Plancksche Energieverteilungsgesetz, nach welchem die Intensität der Strahlung von der Wellenlänge λ proportional $\frac{1}{\lambda^5}\left(e^{\frac{c}{\lambda T}}-1\right)^{-1}$ ist, wobei e die Basis der natürlichen Logarithmen, T die absolute Temperatur und c eine Konstante bedeutet, die nach den neuesten Messungen von Warburg und anderen gleich 1,44 ist, wenn λ in Zentimeter gemessen wird.

Die durch diese Gesetze festgelegten Temperaturskalen stimmen, soviel wir wissen, untereinander und mit der thermodynamischen Skale überein, sofern der richtige Maßstab durch Anschluß bei einem Fundamentalpunkt oder besser bei einer gasthermometrisch bestimmten höheren Temperatur (neuerdings meist der Temperatur des Goldschmelzpunktes) gewählt wird. Infolgedessen ist es möglich, die thermodynamische Skale bis zu weit höheren Temperaturen, als sie mit dem Gasthermometer erreichbar sind, zu realisieren und die Temperaturmessung bis zu beliebig hohen Temperaturen auszudehnen und an beliebig weit entfernten Objekten, z. B. Sternen, vorzunehmen. Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, daß die meisten Objekte nicht die ideale schwarze Strahlung aussenden; doch lassen sich in vielen Fällen die dadurch hervorgerufenen Fehler in der Temperaturmessung mit genügender Genauigkeit ermitteln. Daß bei der Temperaturmessung auf Grund der Strahlung das Meßinstrument nicht an den Ort der zu messenden Temperatur gebracht zu werden braucht, spricht oft zugunsten der Strahlungspyrometer auch in solchen Fällen, in denen andere Pyrometer, z. B. Thermoelemente noch anwendbar sind.

Ueber die Methoden der Strahlungsmessung, soweit sie nicht unter 6 behandelt sind, vgl. den Artikel „Strahlungsmessung".

Bei der praktischen Temperaturmessung wird, der geschichtlichen Entwicklung entsprechend, auch heute noch als Nullpunkt der Skale meist der Eisschmelzpunkt angenommen, doch bürgert sich für wissenschaftliche Zwecke immer mehr die Zählung vom absoluten Nullpunkt aus ein. Die Zentesimalskale, die das Fundamentalintervall in 100 Temperaturgrade einteilt, wird in der Regel, falls der Eisschmelzpunkt als Nullpunkt angenommen wird, als Celsiusskale bezeichnet, obwohl die letztere ursprünglich eine willkürliche, von der gasthermometrischen und thermodynamischen abweichende Temperaturskale war, da sie die Ausdehnung des Quecksilbers in Glas zwischen 0 und 100° in 100 gleiche Teile einteilte. Außer der Celsiusskale haben praktische Bedeutung noch die Reaumurskale, deren Nullpunkt mit dem der Celsiusskale übereinstimmt, die das Fundamentalintervall aber in 80 Teile einteilt, sowie die Fahrenheitskale, deren Nullpunkt bei —32° C liegt und bei der das Fundamentalintervall in 180 Teile eingeteilt ist. Die Anzahl der Grade C, die n Graden R oder n Graden F entsprechen, ist demnach aus folgenden Gleichungen zu berechnen:

$$n^0 \text{ Reaumur} = \frac{5}{4}\, n^0\, C;$$

$$n^0 \text{ Fahrenheit} = \frac{5}{9}\, (n-32)^0\, C.$$

Im folgenden sind die Temperaturen stets in der absoluten Skale (° abs., T) oder in der Celsiusskale (°C, t) gerechnet.

2. Gasthermometer. Um die Analogie mit den Flüssigkeitsthermometern zu wahren, wurde im vorhergehenden angenommen, die gasthermometrische Temperaturmessung erfolge in der Weise, daß die Volumzunahme einer unter konstantem Druck stehenden abgeschlossenen Gasmenge beobachtet wird. Solche Gasthermometer konstanten Druckes, die besonders in England verwendet worden sind, werden indessen neuerdings weniger benutzt als Gasthermometer konstanten Volumens, bei denen aus der Druckzunahme der auf konstantem Volumen gehaltenen Gasmenge auf die Temperatur geschlossen wird.

Allgemein besteht für ein Gas im idealen Gaszustand zwischen Volumen V, Druck pro Fläheneinheit p und absoluter Temperatur T die als Zustandsgleichung bezeichnete einfache Beziehung pV = RT, in der R eine von Masse und Molekulargewicht der benutzten Gasmenge abhängige Kon-

stante (Gaskonstante) ist, die indessen bei der Temperaturmessung nicht eingeht. Beobachtet man nämlich, um den Temperaturmaßstab festzulegen, Druck und Volumen bei 0° C ($T = T_0$; $p = p_0$; $V = V_0$) und bei 100° C ($T = T_0 + 100$; $p = p_{100}$; $V = V_{100}$), so ergibt sich:

$$pV : p_0V_0 = T : T_0;$$
$$p_{100}V_{100} : p_0V_0 = (T_0 + 100) : T_0;$$
$$\text{oder: } pV = \frac{T}{T_0}\, p_0V_0;$$
$$T_0 = 100\, \frac{p_0V_0}{p_{100}V_{100} - p_0V_0}.$$

Setzt man nun a) wie beim Gasthermometer konstanten Druckes $p = p_{100} = p_0$, b) wie beim Gasthermometer konstanten Volumens $V = V_{100} = V_0$, so erhält man:

$$\text{a)} \quad V = V_0\left(1 + \frac{T - T_0}{T_0}\right);\ T_0 = 100\, \frac{V_0}{V_{100} - V_0};$$

$$\text{b)} \quad p = p_0\left(1 + \frac{T - T_0}{T_0}\right);\ T_0 = 100\, \frac{p_0}{p_{100} - p_0}.$$

Der Koeffizient $\frac{1}{T_0}$ von $T - T_0$ gibt in a und b an, um den wievielten Teil des Wertes bei 0° C sich das Volumen oder der Druck bei Temperaturzunahme um 1° C vergrößert und wird im Fall a als Wärmeausdehnungskoeffizient, im Fall b als Spannungskoeffizient bezeichnet.

Für ein vollkommen ideales Gas ist also Wärmeausdehnungskoeffizient und Spannungskoeffizient gleich groß und zwar gleich dem reziproken Wert der absoluten Temperatur des schmelzenden Eises $\left(= \frac{1}{273,1}\right)$.

Man legt nun die obigen Gleichungen a) und b) auch für die bei der praktischen Gasthermometrie verwendeten, nicht vollkommen idealen Gase zugrunde, erhält dann aber für Ausdehnungskoeffizient und Spannungskoeffizient etwas voneinander abweichende Werte, und auch die nach den Gleichungen a) und b) ermittelten Temperaturen $t = T - T_0$ unterscheiden sich dann etwas voneinander und von den in der thermodynamischen Skale gültigen Temperaturen.

Darauf, wie sich auf Grund des 2. Hauptsatzes der Wärmetheorie die zur Reduktion auf die thermodynamische Skale nötigen Korrektionen aus dem Joule-Thomson-Effekt, den Isothermen der Gase usw. errechnen lassen, kann hier nicht eingegangen werden. Es mag auf die einschlägigen Arbeiten von Planck, Berthelot, Buckingham verwiesen und hier nur eine Zusammenstellung einiger Zahlenresultate gegeben werden:

Temperatur °C	Korrektionen für Gasthermometer		
	konstanten Volumens mit		konstanten Drucks mit Luft
	Wasserstoff	Stickstoff	
— 200	+ 0,05	+ 0,7	+ 1,1
100	+ 0,01	+ 0,1	+ 0,4
0	0	0	0
50	— 0,0005	— 0,004	— 0,017
100	0	0	0
200	+ 0,002	+ 0,03	+ 0,10
450	+ 0,012	+ 0,14	+ 0,50
1000	—	+ 0,57	+ 1,7
1500		+ 0,8	+ 3,0

Hierbei ist vorausgesetzt, daß der Druck bei 0° C 760 mm Quecksilber beträgt; beträgt er p mm, so sind die Korrektionen mit p:760 zu multiplizieren.

Im folgenden soll noch auf die praktische Seite der Gasthermometrie eingegangen und dabei das Gasthermometer konstanten Volumens zugrunde gelegt werden.

Ein solches Thermometer besteht im wesentlichen aus dem Gasthermometergefäß aus Glas, Porzellan oder Metall, das z. B. in einen Thermostaten (siehe unter 9) zusammen mit anderen Thermometern, die mit dem Gasthermometer verglichen werden sollen, eingetaucht wird und in der Regel etwa 50 bis 200 ccm Inhalt hat, und aus einem Quecksilbermanometer, das mit dem Gasthermometergefäß durch eine feine Kapillare (meist aus Platin) verbunden ist. Das Manometer muß, um für sehr tiefe wie für sehr hohe Temperaturen brauchbar zu sein, gestatten, Drucke von wenigen Millimetern bis zu 2 m Quecksilberhöhe zu messen. Das Manometer eines in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt befindlichen Gasthermometers ist in der Figur 1 dargestellt. Es sind A und B die beiden Schenkel des Manometers, die unten durch den Quecksilberbehälter R miteinander verbunden sind, aus dem durch den Stahlhahn H Quecksilber abgelassen werden kann, während der Zufluß durch das Rohr C aus dem Gefäß G durch den Stahlhahn E erfolgt. Kleine Aenderungen in den Quecksilbersäulen, wie sie für die Feinstellung notwendig sind, werden durch die Schraube S hervorgerufen, mit der der Boden des Gefäßes, eine dünne Stahlplatte, bis zu einem gewissen Grade eingedrückt werden kann. Der lange Schenkel B hat 2 m Länge und etwa 15 mm lichte Weite und ist bei neueren Messungen mit einem evakuierten Raum verbunden worden, wodurch man unabhängig von den Schwankungen des Barometerstandes wird. Der kurze Schenkel A von etwa 80 cm Länge ist oben, wo er ebenfalls etwa 15 mm lichte Weite hat, durch eine Metallkappe mit ebener Endfläche verschlossen, aus der nach unten eine 0,4 mm lange, als Einstellmarke dienende Spitze hervorragt, während oben sich die zum Thermometergefäß führende Platinkapillare ansetzt. Der Dreiweghahn J und der Dreiweghahn K dient zum Evakuieren und Füllen des Gasthermometergefäßes, wozu indessen neuerdings ein unmittelbar vor dem Gefäß in die Platinkapillare mündender,

mit Quecksilber verschließbarer Hilfsschenkel angebracht worden ist. Zur Messung der Temperatur der Quecksilbersäule sind in der Kappe von A und an mehreren Stellen von B Quecksilber-

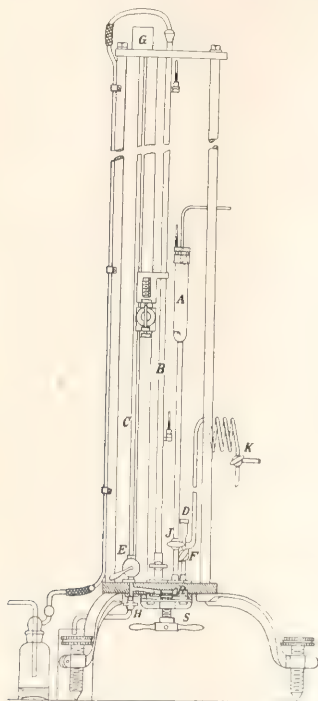


Fig. 1.

thermometer vorhanden; letztere tauchen in kurze mit Quecksilber gefüllte Gefäße. Zum Schutz gegen Strahlung ist das Thermometer bei den neueren Messungen mit einem Mantel aus Nickelblech umgeben mit kleinen, glasbedeckten Oeffnungen an den Ablesestellen. Neben dem Schenkel B befindet sich ein in Millimeter geteilter Maßstab, auf dem eine Visiervorrichtung mit Nonius verschiebbar ist. Statt der Visiervorrichtung kann zum Ablesen auch ein Kathetometer benutzt werden.

Bei der praktischen Messung mit dem Gasthermometer kann die oben angegebene Gleichung b nicht direkt zur Berechnung von $T - T_0 = t$ benutzt werden, sondern es sind gewisse Korrektionsgrößen einzuführen: Es muß die Wärmeausdehnung des das Gas enthaltenden Gefäßes und die elastische Dehnung desselben bei Druckänderungen berücksichtigt werden, sowie der Umstand, daß das Gas in der Verbindungskapillare zwischen Gefäß und Manometer und der kleine Gasraum im kurzen Schenkel A nicht die zu messende Temperatur hat.

Wird die Summe beider Volumina, „der schädliche Raum" mit v_s, die mittlere Temperatur desselben mit t_s, der kubische Wärmeausdehnungskoeffizient des Gefäßes mit γ und der die Abhängigkeit des Gefäßvolumens V vom Innendruck p angebende Druckkoeffizient mit k bezeichnet, so führt die Ueberlegung, daß die gesamte Gasmasse bei allen Temperaturen die gleiche sein muß, zu folgenden Formeln:

$$t = \frac{1}{\beta}\left(\frac{P}{P_0} - 1\right); \quad \beta = \frac{P_{100} - P_0}{100 P_0};$$

$$P = p\left(1 + \gamma t + kp + \frac{v_s(1 + \beta t)}{V_0(1 + \beta t_s)}\right).$$

Es berechnet sich also t nach Gleichungen, die den Gleichungen b) ganz analog sind, nur daß statt der direkt gemessenen und auf gleiche Temperatur der Quecksilbersäule reduzierten Drucke p die Größen P auftreten. In der Formel für P tritt zwar die zu messende Temperatur t schon auf; doch genügt es, für t hierbei einen Näherungswert (z. B. nach den Gleichungen b) berechnet) zu verwenden, da es sich nur um Korrektionsgrößen handelt.

Als Material für die Gefäße benutzten Wiebe, Böttcher und Mahlke bis 500° C Jenaer Glas 59 III, Chappuis und Harker bis 600° C Berliner Porzellan, Holborn und Day bis 1000° C Berliner Porzellan, Holborn und Valentiner bis 1600° C Platiniridium und reines Iridium, Day und Sosman bis 1600° C Platinrhodium mit 10% Rhodiumgehalt, Holborn und Henning bis 450° Jenaer Glas 59 III und Quarzglas, Kamerlingh-Onnes, Holborn und andere unter 0° C Jenaer Glas 59 III. Zur Gasfüllung wird bis 500° C Wasserstoff oder Stickstoff, oberhalb 500° C Stickstoff, unterhalb 0° C Wasserstoff oder noch besser Helium verwendet. Wird der Anfangsdruck bei 0° C nicht zu hoch gewählt, so läßt sich mit dem Heliumthermometer die thermodynamische Skale bis nahe an den absoluten Nullpunkt mit genügender Genauigkeit realisieren, selbst bis zu solchen Temperaturen, bei denen das unter Atmosphärendruck stehende Helium schon verflüssigt ist, was bei etwa 4,5° abs. eintritt.

Die Messungen mit dem Gasthermometer sind nach dem Vorstehenden so kompliziert, daß dasselbe nur zur Bestimmung von thermometrischen Fixpunkten und zur Eichung von anderen, einfacher zu handhabenden Temperaturmeßgeräten verwendet werden kann. Als solche Instrumente dienen in tiefen Temperaturen hauptsächlich Platin- und Goldwiderstandsthermometer, in Temperaturen bis 500° C Platinwiderstandsthermometer, und teils auch noch Queck-

silberthermometer, in Temperaturen über 500° C meist Thermoelemente aus Platin und Platinrhodium mit 10% Rhodiumgehalt. Diese Instrumente dienen dann ihrerseits zur Eichung von anderen, nicht direkt mit dem Gasthermometer verglichenen Thermometern, vor allem aber werden, soweit sich dies nicht mit dem Gasthermometer leicht ausführen läßt, Fixpunkte mit ihnen bestimmt, um die gasthermometrische bezw. thermodynamische Skale möglichst sicher und leicht reproduzierbar festzulegen.

3. **Flüssigkeitsthermometer.** Dieselben benutzen die Wärmeausdehnung der Flüssigkeiten relativ zu einem sie enthaltenden festen Gefäß. Um die Ausdehnung möglichst sichtbar zu machen, wird an das eigentliche Thermometergefäß ein Rohr mit kapillarer Oeffnung (Thermometerkapillare) gesetzt, in der sich der Meniskus der Flüssigkeit (das Ende des Flüssigkeitsfadens) bei einer Volumänderung der im Gefäß enthaltenen Flüssigkeitsmenge verschiebt. Als Flüssigkeit kommt hauptsächlich zur Verwendung: Quecksilber (zwischen −30 und +750° C), Aethylalkohol (zwischen −80 und +40° C) und technisches Pentan (zwischen −200 und +20° C). Um das Sieden des Quecksilbers zu verhindern, wird bei Quecksilberthermometern für Temperaturen oberhalb 300° C der obere Teil der Kapillare mit einem indifferenten Gas (Stickstoff oder Kohlensäure) unter hohem Druck (bis über 50 Atm.) gefüllt. Eine Stickstoffüllung unter niedrigem Druck empfiehlt sich auch schon für Quecksilberthermometer zwischen 200 und 300° C. Bei Thermometern für tiefere Temperaturen wird der nicht mit Flüssigkeit gefüllte Teil luftleer gemacht.

Als Material für Gefäß und Kapillare dient Glas, und zwar insbesondere Jenaer Glas der Firma Schott und Genossen (Glas 16^III bis +350° C, Glas 59^III bis 510° C, Verbrennungsröhrenglas bis 575° C), französisches verre dure (bis etwa 400° C) und bis 750° C Quarzglas (geschmolzener Bergkristall).

Das gewöhnliche Thüringer Thermometerglas weist starke Nachwirkungserscheinungen auf: Durch einmaliges Erhitzen auf 100° C z. B. tritt zufolge Dehnung des Gefäßes eine erst allmählich im Laufe von Stunden wieder verschwindende Erniedrigung des Eispunktes (der Anzeige bei 0° C) um etwa 0,5° C ein, und im Laufe der Jahre steigt der Eispunkt zufolge allmählich eintretender Zusammenziehung des Gefäßes erheblich (bis zu mehreren Graden) an. In dieser Hinsicht ist durch die im Jenaer Glastechnischen Laboratorium von Schott insbesondere auf Grund der Untersuchungen und auf Anregung von Wiebe erschmolzenen Thermometergläser ein großer Fortschritt erzielt worden: Die Depression des Eispunktes nach Erhitzen auf 100° C beträgt bei Jenaer Glas 16^III nur noch etwa 0,09 und bei 59^III sogar nur etwa 0,03°. Bei dem französischen verre dure beträgt die entsprechende Größe etwa 0,11°. Die noch vorhandene Eispunktsdepression verhält sich so regelmäßig, daß sie sicher berücksichtigt werden kann. Bei feineren Messungen wird nach dem Vorgange von Pernet stets der alsbald nach der Erhitzung gefundene Eispunkt zugrunde gelegt, d. h. es wird die Differenz zwischen dem so gefundenen Nullpunkt und dem der Teilung als Eispunktskorrektion zu allen gemessenen Temperaturen hinzugefügt. Dadurch ist es möglich, zwischen 0 und 100° C eine Genauigkeit von wenigen Tausendsteln, bis 300° C von wenigen Hundertsteln und bis 500° von etwa einem Zehntel Grad mit Quecksilberthermometern zu erreichen. Selbst zur dauernden Festlegung der internationalen Wasserstoffskale zwischen 0 und 100° C (siehe unter 1) dienen Quecksilberthermometer, die vom Comité international des poids et mésures aufbewahrt werden.

Man unterscheidet bei Thermometern für wissenschaftliche Zwecke Stabthermometer (Fig. 2) und Einschlußthermometer (Fig. 3). Die ersteren bestehen einfach aus einer dickwandigen Kapillare mit angeschmolzenem Gefäß. Die Teilung befindet

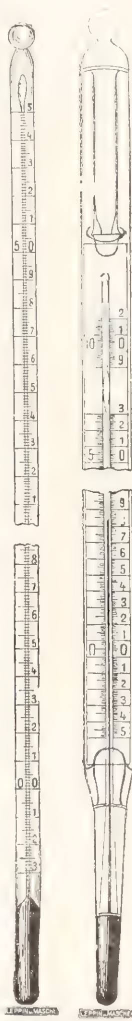


Fig. 2. Fig. 3.

sich direkt auf der Kapillare. Bei den Einschlußthermometern dagegen ist die Teilung auf eine besondere Skalenplatte geätzt, die zusammen mit der dünnwandigen Kapillare in ein Umhüllungsrohr eingeschlossen ist. Die Skalenplatte muß sich gegen die Kapillare ausdehnen können, aber an einer Stelle mit ihr verbunden sein. Bei einfacheren Thermometern wird dies dadurch erreicht, daß die Skalenplatte am oberen Ende des Umhüllungsrohrs mit diesem verschmolzen ist. Bei besseren Thermometern empfiehlt sich die in Figur 3 dargestellte Fueßsche Konstruktion, bei der das untere Ende der Skalenplatte auf einen am Thermometergefäß angeschmolzenen Becher durch eine am oberen Ende des Umhüllungsrohrs angebrachte Stahlfeder gedrückt wird.

Die Eichung der Flüssigkeitsthermometer kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen: Entweder kann man die Thermometer mit einem an das Gasthermometer angeschlossenen Normalthermometer vergleichen und dadurch die richtige Teilung der Skale oder die Korrektionen der Teilung empirisch ermitteln, oder man kann für eine bestimmte Flüssigkeit in einer bestimmten Glassorte ein für allemal bestimmen, welche Korrektionen anzubringen sind, wenn man die relative Ausdehnung der Flüssigkeit im Glas als gleichmäßig verlaufend ansieht und danach die Temperatur ermittelt. Um diese Korrektionen, die als Korrektionen auf das Gasthermometer oder kurz als Gaskorrektionen bezeichnet werden, benutzen zu können, muß man fundamental bestimmbare und kalibrierbare Thermometer haben. Man versteht darunter Thermometer, welche bei 0 und 100° C beobachtbar sind und eine gleichmäßige, eventuell unterhalb 0 und oberhalb 100° C gleichmäßig fortgesetzte Teilung besitzen, die durch Kalibrierung daraufhin geprüft werden kann, ob einer gleichen Anzahl von Teilstrichen ein gleich großes inneres Kapillarvolumen entspricht. Zur genauen Ermittlung und Ausgleichung der Kaliberkorrektionen sind besondere Methoden ausgearbeitet worden, von denen die Neumann-Thiesensche hervorgehoben werden mag.

Bei fundamental bestimmbaren Thermometern, die nur für bestimmte Temperaturintervalle, z. B. 200 bis 300° C, benutzt werden sollen, bringt man, um die Thermometer zu kürzen, dort, wo die Teilung nicht gebraucht wird, nach dem Vorgang von Pernet in der Kapillare Erweiterungen an (in Figur 3 zwischen 50 und 100°). Auch wenn eine solche Erweiterung zwischen 0 und 100° C liegt, ist die Teilung und Kalibrierung durch Abtrennen und Verschieben der zwischen 0 und 100° befindlichen Flüssigkeitsmenge oder eines gemessenen Teils derselben möglich, da man an einer von Erweiterungen freien Strecke der Kapillare die Fadenlänge von 100° oder einen entsprechenden Teil derselben erhält.

Auch bei nicht fundamental bestimmbaren Thermometern, die die Fundamentalpunkte nicht zu enthalten brauchen, können Erweiterungen angebracht werden, wenn die Thermometer für 2 verschiedene Intervalle, z. B. 100 bis 200 und 300 bis 400°C gebraucht werden sollen.

Außer der Gaskorrektion, der Kaliberkorrektion und der Eispunktskorrektion (S. 12) sind an fundamental bestimmbaren Thermometern noch die Gradwertskorrektion und die Korrektion wegen inneren und äußeren Druckes anzubringen, bei Einschlußthermometern außerdem die Korrektion wegen der relativen Ausdehnung der Skale zur Kapillare. Die Gradwertskorrektion ist dadurch bedingt, daß es praktisch nicht möglich ist, die Strecke 0 bis 100 der Teilung genau gleich 100° C zu machen, so daß 1° der Teilung nicht genau gleich $^1/_{100}$ des Fundamentalabstandes ist. Die Korrektion wegen inneren und äußeren Druckes wird nötig wegen der elastischen Dehnung des Gefäßes unter dem Druck der inneren Flüssigkeitssäule oder dem Druck der Flüssigkeit, in die das Thermometer eingetaucht wird usw. Diese Korrektionen werden empirisch ermittelt, diejenige wegen inneren Druckes z. B. dadurch, daß das Thermometer sowohl in horizontaler wie in vertikaler Lage geprüft wird. Die Korrektionen wegen der relativen Ausdehnung der Skale gegenüber der Kapillare sind aus der linearen Wärmeausdehnung des Skalenmaterials (Wiebe und Moeller) rechnerisch zu ermitteln, was bei Einschlußthermometern mit Erweiterungsstellen in der Kapillare allerdings im Zusammenhang mit den sonstigen Korrektionen geschehen muß (Meißner).

Bei der Prüfung von fundamental bestimmbaren Hauptnormalthermometern in der Reichsanstalt werden die einzelnen, oben angegebenen Korrektionen außer der ein für allemal bekannten Gaskorrektion ermittelt und außerdem noch Kontrollvergleichungen mit den Normalthermometern der Reichsanstalt vorgenommen. Die vorgeschriebenen Fehlergrenzen für solche Instrumente betragen: für den Fundamentalabstand 0,1° C, für die Kaliberfehler als Differenz der größten Abweichungen 0,25° C, für die Teilungsfehler der Skale 0,05 des kleinsten Intervalls. Die Depression des Eispunktes darf 5 Minuten nach halbstündigem Erhitzen auf 100° den Betrag von 0,25° nicht überschreiten. Die Gesamtkorrektionen werden in den Prüfungsscheinen auf 0,01° C abgerundet mitgeteilt.

Die als Laboratoriumsthermometer bezeichneten, nicht fundamental bestimmbaren Thermometer für wissenschaftliche und tech-

nische Zwecke sollen Skalen besitzen, die unter Berücksichtigung aller Korrektionen geteilt sind, so daß an den Thermometern die Temperaturen direkt in der gasthermometrischen bezw. thermodynamischen Skale abgelesen werden können. Die von der Reichsanstalt für solche Instrumente vorgeschriebenen Fehlergrenzen liegen zwischen 0,25° bei feineren Thermometern von 0 bis 100° C) und 5° (bei Thermometern bis 500° C).

Als meteorologische Thermometer bezeichnet man Thermometer zur Bestimmung der Temperatur der Luft, der Gewässer, des Erdbodens, der Sonnenstrahlung, des Taupunktes usw. Es handelt sich dabei um Temperaturen zwischen —70 und +100° C. Ueber Aspirationsthermometer siehe unter 8.

Siedethermometer für Höhenbestimmungen (Hypsometer) enthalten in der Regel das Intervall 70 bis 102° C und bisweilen außerdem eine Hilfsteilung bei 0° C. Da die Abhängigkeit des Wassersiedepunktes vom Barometerstand bekannt ist, kann man aus der Siedetemperatur des Wassers den atmosphärischen Luftdruck und aus diesem die Höhe des Beobachtungsortes berechnen. Oft wird die Skale der Siedethermometer statt in ° C direkt in Millimeter Luftdruck geteilt. Zu den Hypsometern wird ein transportabler, mit Spirituslampe heizbarer Wassersiedeapparat Fueßscher oder Grützmacherscher Konstruktion benutzt.

Die ärztlichen Thermometer (Fieberthermometer) sollen von 36 bis 42° C reichen und in 0,1° geteilt sein. Nach den neuesten Vorschriften müssen die Umhüllungsrohre der zu prüfenden Fieberthermometer in Einschlußform (Fig. 4) oben zugeschmolzen sein. Dann besitzen diese Thermometer eine vollkommen glatte Oberfläche, so daß sie sich leicht desinfizieren lassen. Die Fieberthermometer in Stabform (Fig. 5), von denen besonders die amerikanischen sehr kleine Gefäße besitzen, haben den Vorzug sehr geringer Trägheit, aber den Nachteil, daß die Teilstriche schwer zu desinfizieren sind und leicht undeutlich werden. Erwähnenswert sind die neuerdings hergestellten Stabeinschlußthermometer (z. B. die von der Firma C. Kellner Fig. 6), die im unteren Teil als Stabthermometer ausgebildet sind und nur da, wo die Skale sich befindet, ein Umhüllungsrohr haben. Das Kapillarglas der Fieberthermometer, besonders das der Stabthermometer, besitzt meist prismenartigen Querschnitt (Fig. 5), wodurch bei richtiger Formgebung (Meißner) sich eine sehr starke (bis 50fache) optische Verbreiterung des sonst sehr schwer erkennbaren Quecksilberfadens erreichen läßt. Die empfindlichsten Fieberthermometer, die als Halbminutenthermometer oder dgl. bezeichnet werden, nehmen die Temperatur im Mund in etwa 1 Minute an; unter der Achsel müssen selbst diese aber mindestens 3 Minuten gelassen werden, da dort die Wärmeübertragung viel schlechter als im Mund ist. Die Maximumvorrichtung der Fieberthermometer besteht bei den Einschlußthermometern aus einem im Gefäßboden eingeschmolzenen Glasstift, der ein wenig in die Kapillare hineinreicht, so daß dort eine Verengung entsteht, an der der Faden beim Sinken der Temperatur abreißt. Bei den Stab- und den Stab-Einschlußthermometern wird etwas oberhalb des Gefäßes die Hicksche Maximumvorrichtung angebracht, bei der die Kapillare in 2 sehr feine Kanäle geteilt ist, die das Abreißen



Fig. 4.



Fig. 5.



Fig. 6.

des Fadens hervorrufen. In beiden Fällen läßt sich der Quecksilberfaden durch schleudernde Bewegung des Thermometers ins Gefäß zurücktreiben.

Abreißvorrichtungen ähnlich den angegebenen finden auch bei meteorologischen Thermometern (siehe weiter oben) Verwendung, sowie bei den Umkippthermometern zur Messung der Meerestemperatur in großen Tiefen, die zum Schutz gegen den hohen Wasserdruck noch in ein besonderes starkwandiges Glasrohr eingeschlossen sind. Das Abreißen des Quecksilberfadens wird bei ihnen dadurch hervorgerufen, daß das Thermometer in der zu untersuchenden Meerestiefe mittels einer besonderen Vorrichtung umgekippt wird, so daß das vorher unten befindliche Gefäß nach oben kommt. Aus der Länge des abgerissenen Quecksilberfadens, der in das obere Ende der Kapillare fällt, kann

später die Temperatur in der zu untersuchenden Meerestiefe an einer zweckentsprechend geteilten Skale abgelesen werden. Etwas oberhalb der Abreißstelle ist eine sackartige Erweiterung angebracht, in der nach dem Umkippen bei steigender Temperatur das durch die Abreißstelle tretende Quecksilber sich ansammelt.

Bei dem Maximum-Minimum-Thermometer für häuslichen Gebrauch nach Six befinden sich im Inneren der Kapillare 2 kleine, von einem Glasröhrchen eingeschlossene, mit geringer Reibung verschiebbare Eisenstäbchen, die von außen her mit einem Magneten verschoben werden können und in folgender Weise zur Anzeige der Maximal- und Maximaltemperatur benutzt werden: Als Thermometerflüssigkeit dient Alkohol. Im Alkoholfaden befindet sich das eine Eisenstäbchen. An den Alkoholfaden schließt sich ein Quecksilberfaden an, und im darauffolgenden Teil der Kapillare ist das 2. Eisenstäbchen enthalten. Der Quecksilberfaden bewegt sich mit dem Alkoholfaden mit und schiebt beim Fallen der Temperatur das 1. Stäbchen bis zur Minimaltemperatur, beim Steigen der Temperatur mit seinem anderen Ende das 2. Stäbchen bis zur Maximaltemperatur vor sich her. Die Kapillare ist in der Mitte des Quecksilberfadens U-förmig umgebogen und es sind 2 Skalen am Anfang und am Ende des Quecksilberfadens vorhanden.

Bei den Beckmannschen Thermometern ist die Kapillare oben nach unten umgebogen und mit einer Erweiterung versehen, in welche ein Teil des Quecksilbers aus dem Gefäß gebracht werden kann. Dadurch ist es möglich, ein kurzes Thermometer trotz sehr großer Skalenlänge pro ° C in beliebigen Temperaturen zu benutzen.

Die Quarzglasquecksilberthermometer werden von der Firma Siebert u. Kühn als Einschlußthermometer mit einer Skalenplatte aus undurchsichtigem (lufthaltigem) Quarzglas und mit Stickstofffüllung für Temperaturen bis 750° C hergestellt. Die Skalen sind empirisch auf Grund von Prüfungsergebnissen der Reichsanstalt geteilt. Obwohl Quarzglas wohl die geringsten Nachwirkungserscheinungen aufweist, eignet es sich nicht zum Ersatz der Jenaer Gläser, da sich die Kapillaren bisher nicht genügend kalibrisch herstellen lassen. Wertvoll sind die Quarzglasthermometer daher erst für Temperaturen oberhalb 575° C.

Als Thermometer für tiefe Temperaturen dienen neben Aethyl-Alkoholthermometern, die von +40° bis —80° C benutzt werden und Toluolthermometern, die vor den Alkoholthermometern den Vorzug haben, daß sie bis +100° C brauchbar sind, hauptsächlich Thermometer mit Füllung aus technischem Pentan (Rothe), die bis —200° C gut verwendbar sind, sofern die Füllung sauber hergestellt ist und die Thermometer hinreichend langsam (zuerst das Gefäß!) abgekühlt werden. Die Eichung in der Reichsanstalt erfolgt in der Regel nur in fester Kohlensäure und in flüssiger Luft (siehe unter 9), da die Skale an Zwischenpunkten nach einer von Hoffmann und Rothe aufgestellten Ausdehnungsformel geteilt werden kann.

Falls sich nicht der ganze Flüssigkeitsfaden in der zu messenden Temperatur befindet, ist an der Anzeige aller Flüssigkeitsthermometer noch eine Korrektion wegen des herausragenden Fadens (Fadenkorrektion) anzubringen. Zur Ermittlung derselben mißt man die mittlere Temperatur des nicht in die zu messende Temperatur eintauchenden Fadenteils mit mehreren Hilfsthermometern oder besser, sofern dies angängig ist, mit einem Fadenthermometer (Guillaume-Mahlke).

Letzteres besitzt ein langes zylindrisches Gefäß, deren oberes Ende in gleiche Höhe mit dem Fadenende des zu korrigierenden Thermometers gebracht wird und das nach unten mindestens bis zu der Stelle reichen muß, wo die zu messende Temperatur anfängt. Die Fadenkorrektion des Fadenthermometers selbst ist zu vernachlässigen. Erstreckt sich das Gefäß des Fadenthermometers über n Grade des zu korrigierenden Thermometers, das die Temperatur t anzeigt, und ist t_0 die Temperaturanzeige des Fadenthermometers, so ist die Fadenkorrektion a $n(t-t_0)$, wobei a der Ausdehnungskoeffizient der Flüssigkeit im Glas ist. Derselbe beträgt für Quecksilber in Glas 59^{III} 0,000163, in Glas 16^{III} 0,000157, in Quarzglas 0,000179, für Pentan in Glas 16^{III} 0,00151.

4. Widerstandsthermometer. Dieselben beruhen auf der Aenderung des elektrischen Leitungswiderstandes mit der Temperatur; sie sind als die relativ genauesten Temperaturmeßgeräte für Temperaturen bis hinauf zu 600° C anzusehen und daher in diesen Temperaturen besonders geeignet zur Festlegung der durch gasthermometrische Messungen gewonnenen Temperaturskale, zur Bestimmung von Fixpunkten in dieser Skale und zur Eichung von Normalquecksilberthermometern, Präzisionsthermoelementen u. dgl. Auch oberhalb 600° C (bis etwa 1100° C) sind Widerstandsthermometer noch verwendbar; doch besitzen sie in diesem Gebiet nach den bisher vorliegenden Erfahrungen eine geringere Genauigkeit. Als Widerstandsmaterial kommt hauptsächlich chemisch reines Platin (Platinwiderstandsthermometer oder Platinthermometer, Wilhelm Siemens, Callendar) in Betracht, für welches nach den vorliegenden Vergleichungen mit Gasthermometern (Callendar, Chappuis und Harker, Holborn, Henning) zwischen —50 und +500° C eine quadratische Beziehung

$$W_t = W_0(1 + \alpha t + \beta t^2)$$

zwischen dem zur Temperatur t° C gehörigen Widerstand W_t und der Temperatur t besteht.

Diese Beziehung läßt sich (Callendar) noch einfacher ausdrücken, wenn man eine „Platintemperatur“ tp einführt, die man bei Zugrundelegung einer gleichmäßigen (linearen) Aenderung des Widerstandes mit der Temperatur aus den bei 0°, 100° und t° C beobachteten Widerstandswerten W_0, W_{100} und W_t erhielte und die demnach definiert ist durch

$$t_p = 100\,\frac{W_t - W_0}{W_{100} - W_0}.$$

Es ist dann

$$t - t_p = \delta\left(\frac{t}{100} - 1\right)\frac{t}{100},$$

wobei δ eine Konstante ist, die für reinstes Platin etwa den Wert 1,49 hat und in der Regel durch Beobachtung des Widerstandes beim Schwefelsiedepunkt (siehe unter 9) ermittelt wird. $W_{100}:W_0$ hat für reinstes Platin den Wert 1,00392. Zwischen $W_{100}:W_0$, δ und α, β bestehen folgende Beziehungen:

$$\frac{W_{100}}{W_0} = 1 + 100\alpha + 10000\beta;\ \delta = \frac{-10000\,\beta}{\alpha + 100\,\beta}$$

Um die Temperatur bis auf 0,001° C genau zu messen, muß man den Widerstand bis auf 4 Millionstel seines Wertes bei 0° C bestimmen. Bei derartigen und auch schon bei etwas geringeren Genauigkeitsansprüchen ist die Anwendung der feinsten Widerstandsmeßmethoden erforderlich, sowie die Elimination des Widerstandes der Zuleitungen zum eigentlichen Thermometerwiderstand, die nicht ihrer ganzen Länge nach in die zu messende Temperatur gebracht werden können.

Bei der Widerstandsmessung mit Wheatstonescher Brücke kann letzteres auf zwei Arten geschehen: Entweder man legt in den Brückenzweig, der gegen den Thermometerwiderstand abgeglichen wird, zwei hintereinander geschaltete Drähte, die genau dieselben Dimensionen wie die beiden Zuleitungsdrähte des Thermometers haben und im Innern des Thermometers in der Weise angebracht werden, daß sie genau dieselbe Erwärmung wie die Zuleitungen erfahren, oder (Fig. 7) man legt den Verzweigungs-

Fig. 7.

punkt des Meßstromes an das eine Ende des Thermometerwiderstandes, zu dem dann im ganzen 3 Zuleitungen führen, von denen zwei genau gleiche Dimensionen haben müssen. Empfehlenswerter, als mit Wheatstonescher Brücke zu messen, ist es, den Widerstand dadurch zu bestimmen, daß man die Spannung an den Enden des Thermometerwiderstandes mit der Spannung an den Enden eines Normalwiderstandes vergleicht, der vom selben Strom wie das Thermometer durchflossen wird, so daß sich die Widerstände zueinander wie die Spannungen verhalten. Bei dieser Methode müssen zu jedem Ende des Thermometerwiderstandes 2 Zuleitungen führen, die aber nicht gegeneinander abgeglichen zu sein brauchen. Zur Vergleichung der Spannungen dient am besten ein Kompensationsapparat, insbesondere der thermokraftfreie Apparat nach Dießelhorst, der einen kleinen Widerstand besitzt. Ein für Präzisionszwecke geeignetes Platinthermometer mit 4 Zuleitungen ist in Figur 8 dargestellt. Der Platinwiderstand

Fig. 8.

ist auf ein Glimmerkreuz locker aufgewickelt, damit Dehnungen beim abwechselnden Erwärmen und Abkühlen vermieden werden. Die Zuleitungen Z, auf welche Kapillarröhrchen L und Glimmerscheiben G zur Verhinderung von Luftströmungen gezogen sind, können für Tem-

peraturen bis 450° C aus Silber, für tiefere Temperaturen, in denen Kupfer noch nicht oxydiert, auch aus Kupfer hergestellt werden. Oberhalb 450° C sollte auch für die Zuleitungen nur Platin verwendet werden. Die Verbindungsstellen der Platinzuleitungen mit den Anschlußklemmen oder kupfernen Anschlußdrähten (in Fig. 8 bei K) müssen nahe beieinander und gut geschützt liegen, damit schwankende thermoelektrische Kräfte vermieden werden. Der Kopf des Thermometers ist in Figur 8 von einer Wasserkühlung zum Gebrauch in höheren Temperaturen umgeben.

Für technische Zwecke kann der Widerstand der Zuleitungen vernachlässigt werden, wenn der Platinwiderstand selbst nicht zu klein ist (bei den gebräuchlichen Thermometern meist zwischen 25 und 100 Ohm).

Für praktische Meßzwecke kann die Wheatstonesche Brücke so eingerichtet werden, daß an dem veränderlichen Zweig desselben, der einreguliert wird, bis das in die Brücke eingeschaltete Galvanometer stromlos ist, eine Skale angebracht wird, an welcher die zu messende Temperatur abgelesen werden kann. Eine andere, z. B. von W. C. Heraeus, Hanau, angewendete Methode für praktische Meßzwecke besteht darin, daß in der Wheatstoneschen Brücke außer dem Thermometerwiderstand alle Widerstände unverändert bleiben und das in die Brücke eingeschaltete Zeigergalvanometer, das dann nur bei einer bestimmten Temperatur des Thermometers auf 0 einsteht, mit einer in Temperaturgrade empirisch geteilten Skale versehen wird. Bei dieser Methode muß an der Brücke stets ein und dieselbe Spannung liegen, was bei beliebiger Temperatur des Thermometerwiderstandes dadurch erreicht wird, daß an Stelle des Thermometers ein konstanter Widerstand eingeschaltet und ein vor die Stromquelle gelegter Regulierwiderstand verändert wird, bis das Zeigergalvanometer auf eine bestimmte Marke einsteht. Die letztere Methode kann leicht registrierend gemacht werden, indem an Stelle des gewöhnlichen Zeigergalvanometers ein „Registriergalvanometer" gesetzt wird, bei dem von dem Zeiger auf einem ablaufenden Papierstreifen eine Kurve beschrieben wird. Werden die vorstehenden Schaltungen dazu benutzt, um die Widerstandsthermometer von beliebiger Stelle aus abzulesen (Fernthermometer), so ist darauf zu achten, daß der Widerstand der zu dem Thermometer führenden Leitungen klein genug gegen den Thermometerwiderstand ist.

Eine für praktische Zwecke sehr geeignete Thermometertype ist das Quarzglaswiderstandsthermometer von W. C. Heraeus, Hanau, bei dem die Platinwiderstandsspule in Quarzglas eingeschmolzen ist. Diese Thermometer besitzen zwar nicht die hohe Konstanz der Thermometer mit auf Glimmer gewickeltem Platin, haben aber sehr geringe Trägheit (s. unter 8) und lassen sich bis 900° C gut gebrauchen.

Als Widerstandsmaterial kommt außer Platin vielfach Nickel zur Verwendung. Dasselbe besitzt einen höheren Temperaturkoeffizienten des Widerstandes als Platin; dagegen besteht bei ihm keine einfache Beziehung zwischen Temperatur und Widerstand (in der Nähe von 300° C besitzt z. B. die diese Beziehung darstellende Kurve einen Knick), so daß Nickelwiderstandsthermometer für Präzisionszwecke ganz ungeeignet sind.

In sehr tiefen Temperaturen (unterhalb −190° C) ist Gold dem Platin vorzuziehen, da es in vollkommenerer Reinheit als Platin zu erhalten ist und daher in der Nähe des absoluten Nullpunktes einfacheren Gesetzen folgt als Platin. Das Verhalten des Widerstandes reiner Metalle in ganz tiefen Temperaturen läßt sich in engen Zusammenhang bringen mit den neuesten Theorien über Elektrizität und Materie, welche durch die von Planck in die Strahlungstheorie eingeführte Quantenhypothese entstanden und von Einstein, Nernst und anderen weiter gebildet worden sind.

5. **Thermoelemente.** Bei denselben wird als Kennzeichen der Temperatur die elektromotorische Kraft benutzt, die in einem aus 2 Leitern gebildeten Stromkreis auftritt, wenn die eine der Verbindungsstellen zwischen den beiden Leitern (meist Lötstellen genannt) auf einer anderen Temperatur gehalten wird als die andere (thermoelektrische Kraft oder kurz Thermokraft). Die thermoelektrische Kraft wird nicht geändert, wenn in den Leitungskreis noch beliebig viele andere Leiter eingeschaltet werden, sofern nur alle Verbindungsstellen derselben ein und dieselbe Temperatur haben. Bestehen die verwendeten Leiter nicht aus völlig homogenem Material, so hängt die entstehende thermoelektrische Kraft nicht nur von der Temperatur der Verbindungsstellen, sondern auch von den Temperaturen der inhomogenen Stellen ab, da an solchen Stellen gewissermaßen Verbindungsstellen zwischen verschiedenartigen Metallen vorhanden sind. Die inhomogenen Stellen haben nur dann keinen Einfluß, wenn jede von ihnen sich ihrer ganzen Ausdehnung nach auf ein und derselben Temperatur befindet. Außer auf Homogenität ist bei der Auswahl der Materialien für thermoelektrische Thermometer besonders auf nicht zu hohen spezifischen Widerstand und in vielen Fällen auf Biegsamkeit und auf Widerstandsfähigkeit gegen hohe Temperaturen zu achten, welchen Bedingungen die Materialien mit besonders hohen Unterschieden in den Thermokräften, wie Roteisenerz, Wismut, Kupferglanz, nicht genügen, so daß man sich mit verhältnismäßig kleinen elektromotorischen Kräften (von der Größenordnung 10 Mikrovolt pro ° C) begnügen muß.

Bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen wird die eine Verbindungsstelle

zwischen den beiden Leitern an den Ort der zu messenden Temperatur gebracht; an die beiden anderen Enden der beiden Leiter werden in der Regel Kupferdrähte angesetzt und die Verbindungsstellen mit diesen auf konstanter Temperatur (meist 0° C oder Zimmertemperatur) gehalten. Die Kupferdrähte werden mit dem Instrument zur Messung der Thermokraft verbunden. Als Differentialthermoelemente bezeichnet man Elemente, die aus drei aneinandergesetzten Stücken der beiden thermoelektrisch wirksamen Materialien bestehen. Die Enden des mittleren Stücks werden an die Stellen gebracht, deren Temperaturdifferenz gemessen werden soll, während die Enden der beiden anderen, aus gleichem Material bestehenden Stücke (eventuell unter Einfügung von Kupferdrähten) an das Meßinstrument gelegt werden.

Mit den Thermoelementen kann man die Temperatur an einer wenig ausgedehnten Stelle messen, die bei guter Wärmeübertragung nicht viel größer als die Lötstelle des Thermoelements zu sein braucht. Wegen der nie völlig zu vermeidenden Inhomogenitäten ist es indessen schwer, mit Thermoelementen dieselbe Genauigkeit wie mit Widerstandsthermometern zu erreichen; wenigstens gilt dies in Temperaturen bis etwa 600° C.

Für Temperaturen unter 0° C verwendet man hauptsächlich Kupfer-Konstantan und Eisen-Konstantanelemente. Eisen besitzt eine geringere Wärmeleitfähigkeit als Kupfer und kann wegen seiner größeren Festigkeit dünner als Kupfer gewählt werden; beides bewirkt, daß die Lötstelle bei Eisen-Konstantanelementen leichter die zu messende Temperatur annimmt als bei Kupfer-Konstantanelementen. Dagegen hat Kupfer einen beträchtlich kleineren Widerstand als Eisen, was für die Empfindlichkeit der Meßanordnung günstig ist. Die Thermokraft ist bei Eisen-Konstantanelementen etwas größer als bei Kupferkonstantanelementen.

Oberhalb 0° C werden hauptsächlich benutzt: Kupfer-Konstantan- und Eisen-Konstantenelemente in Drahtform bis 500°C, Silber-Konstantanelemente in Drahtform bis 650° C, Eisen-Konstantanelemente bestehend aus dicken Stäben oder aus einem Eisenrohr, mit dem an einem Ende ein isoliert durch dasselbe hindurchgezogener Konstantandraht verschweißt ist, bis 900° C. Elemente von ähnlicher Form wie die letzteren, jedoch aus Kupfer und Konstantan (Kupferrohrelemente von Siemens und Halske) werden bis 500°C benutzt.

Für höhere Temperaturen kommen hauptsächlich Thermoelemente aus Edelmetallen in Betracht und zwar bis 1600° C die Le Chatelierschen Elemente aus Platin- und Platinrhodium (mit 10% Rhodiumgehalt), oberhalb 1600° bis etwa 2000° C Elemente aus Iridium und Iridium-Rhutenium (von W. C. Heraeus in Hanau). Die Le Chatelierschen Elemente werden meist aus Drähten von 0,5 bis 0,6 mm Stärke hergestellt, die für technische Zwecke in Montierungen aus Porzellanrohren mit Eisenmantel oder in Montierungen aus Quarzrohren verwendet werden. Für wissenschaftliche Zwecke werden oft auch dünnere Drähte verwendet.

Die Eichung der Thermoelemente erfolgt in der Reichsanstalt bei geringeren Genauigkeitsansprüchen durch Vergleichung mit Normalelementen der Reichsanstalt, bei höheren Ansprüchen durch Messungen an Schmelzpunkten (siehe unter 9) oder in niederen Temperaturen durch Vergleichung mit Platinwiderstandsthermometern.

Für die Le Chatelierschen Elemente besteht im Gebiet 300 bis 1100° C zwischen Thermokraft e und Temperatur t° C eine quadratische Beziehung $e = a + bt + ct^2$, so daß zur Eichung in diesem Intervall 3 Schmelzpunktsbestimmungen (von Cadmium, Antimon und Gold oder Kupfer) genügen. Um die Thermokraft der Le Chatelierschen Elemente im Gebiet 300 bis 1550° C (Palladiumschmelzpunkt) richtig darzustellen, ist nach den neuesten gasthermometrischen Messungen von Day u. Sosman eine Formel dritten Grades $e = a + bt + ct^2 + dt^3$ notwendig.

Ein Mangel der Elemente aus Edelmetallen ist es, daß die Drähte, insbesondere der nicht legierte Draht, durch die Zerstäubung der Edelmetalle, die oberhalb 1000° C auftritt, inhomogen werden: Es lagert sich z. B. auf dem Platinschenkel Rhodium aus dem Platin-Rhodium Schenkel ab und diffundiert wohl auch ins Innere. Dadurch tritt nicht nur eine Aenderung der Thermokraft ein, sondern, was schlimmer ist, auch eine Abhängigkeit derselben von der Temperaturverteilung längs der Drähte („Abhängigkeit von der Eintauchtiefe"). Einen Schutz gegen die Verunreinigung der Drähte bieten Kapillaren aus Quarzglas, die indessen oberhalb 1000° C nur eine sehr begrenzte Lebensdauer besitzen. Außer durch Stäubung der Metalle werden die Le Chatelierschen Elemente auch durch Ofengase leicht verunreinigt.

In außerdeutschen Ländern werden auch oberhalb 900° C Elemente aus unedlen Metallen, insbesondere aus Stahl und Chromnickellegierungen benutzt. Dieselben sind bedeutend billiger als Le Chateliersche Elemente und dürften den Mangel der Aenderung durch Zerstäubung nicht besitzen; dagegen besitzen sie geringe Haltbarkeit und geringere Homogenität des Materials als Le Chateliersche Elemente.

Bei Präzisionsmessungen wird die Thermokraft durch Kompensation gemessen, d. h. dadurch, daß man die Spannung bestimmt, welche an die Enden des Elementes gelegt werden muß, damit in dem entstehenden Stromkreis kein Strom fließt. Hierzu dient entweder einer der gebräuchlichen Kompensationsapparate in Verbindung mit einem Spiegelgalvanometer oder die speziell für Thermoelemente und nach einem anderen Prinzip als die gewöhnlichen Kompensationsapparate angeordnete Lindecksche Kompensationsschaltung.

Bei geringeren Genauigkeitsansprüchen, insbesondere für technische Zwecke, genügt es, zur Messung der Thermokraft ein Zeigergalvanometer zu benutzen, dessen Wider-

stand aber einen relativ zum Thermoelement hohen und auch dem absoluten Betrag nach nicht zu niedrigen Wert haben muß, damit der Spannungsabfall im Thermoelement relativ klein ist und damit keine starken Ströme auftreten, die zu Fehlerquellen Veranlassung geben.

Die Skalen der Zeigergalvanometer werden meist sowohl mit Millivoltteilung als mit Temperaturteilung versehen. Bei der Eichung in der Reichsanstalt wird der Spannungsabfall im Thermoelement berücksichtigt und auch die Abhängigkeit der Anzeige von der Temperatur der Verbindungsstellen zwischen Element und Zuleitungen angegeben. Am einfachsten läßt sich diese berücksichtigen, wenn der Nullpunkt des Galvanometers verstellbar ist (durch Verstellen der Skale oder des Zeigers), da es dann nur notwendig ist, den Nullpunkt vor Beginn der Messung auf die Temperatur der obigen Verbindungsstellen einzustellen. Statt des gewöhnlichen Zeigergalvanometers kann wie bei den Schaltungen für Widerstandsthermometer ein Registriergalvanometer (siehe unter 4; für höhere Temperaturen wohl auch Registrierpyrometer genannt) verwendet werden, um eine dauernde Aufzeichnung des Verlaufes der zu messenden Temperatur zu erhalten.

Bei allen Messungen mit Thermoelementen, insbesondere bei Messungen mit Thermoelementen in Montierung, ist darauf zu achten, daß die Temperatur der Lötstelle nicht gegenüber der zu messenden Temperatur durch Wärmeleitung längs der Schenkel des Elements und längs der Montierungsrohre merklich erniedrigt wird. Bei Elementen, deren Schenkel nackt eintauchen (z. B. bei Kupferrohrelementen), ist auch auf genügende Isolierfähigkeit der Substanz, in welche die Elemente eintauchen, zu achten. Fehler entstehen durch mangelnde Isolation besonders dann, wenn ein Temperaturgefälle in der Substanz vorhanden ist.

6. Strahlungspyrometer. Ueber die Grundlagen der Strahlungspyrometrie siehe unter 1. Die Strahlungspyrometer, zu denen im folgenden auch die sogenannten optischen Pyrometer, die nur die sichtbare Strahlung benutzen, gerechnet sind, ermöglichen nach dem, was unter 1 gesagt ist, zunächst nur die Messung der Temperaturen von Hohlraumstrahlern, welche die sogenannte schwarze Strahlung emittieren. Indessen kommen die Oefen, die in der Technik gebraucht werden, oft solchen Hohlraumstrahlern sehr nahe oder man kann in den Ofen einen Hohlraumkörper stellen, aus dessen Oeffnung die in das Pyrometer gelangende Strahlung austritt. Um mit Strahlungspyrometern die Temperatur von Körpern zu bestimmen, die nicht Hohlraumstrahlung emittieren, muß man die anzubringenden Korrektionen gesondert bestimmen, was für strahlende Metallflächen z. B. durch Bestimmung des Reflexionsvermögens erfolgen kann.

Bei den optischen Pyrometern werden photometrische Methoden benutzt. Trotz der subjektiven Beobachtungsmethode sind dabei die Gesetze der Hohlraumstrahlung, die sich zunächst alle auf die Größe der emittierten Energie beziehen, anwendbar, da im sichtbaren Gebiet der Strahlung die mit dem Auge beobachtete Helligkeit ein Maß für die Energie ist, so daß man z. B. dadurch, daß man die Helligkeit bis auf einen gemessenen Bruchteil schwächt, bis eine bestimmte Normalhelligkeit vorhanden ist, feststellen kann, um wieviel Prozente größer die pro Quadratzentimeter emittierte Energie für den hell strahlenden als für einen Normalhelligkeit besitzenden Körper ist.

Die Schwächung der Strahlung kann z. B. durch einen sogenannten rotierenden Sektor erfolgen, d. h. durch eine rotierende Scheibe mit sektorförmigem Ausschnitt, die so aufgestellt wird, daß bei Stillstand der Scheibe der Sektorausschnitt die Strahlung ungeschwächt durchläßt; rotiert die Scheibe so schnell, daß kein Flimmern bemerkbar ist, so erhält sich die Helligkeit der jetzt durchgelassenen Strahlung zu der Helligkeit der ungeschwächten Strahlung wie der Oeffnungswinkel des Sektorausschnittes zu 360°, und im selben Verhältnis stehen die Energien der durchtretenden Strahlungen.

Im sichtbaren Gebiet der Strahlung kann in der Wien-Planckschen Strahlungsformel (s. unter 1) die 1 gegenüber $e^{\frac{c}{\lambda T}}$, das dann bei Temperaturen unter 3000° mindestens von der Größenordnung Tausend ist, vernachlässigt werden, so daß dieselbe die einfachere, ursprüngliche Wiensche Form $\frac{1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{c}{\lambda T}}$ annimmt.

Das Holborn-Kurlbaum-Pyrometer beruht auf der Photometrie einer durch Farbgläser monochromatisch gemachten, d. h. auf Strahlen gleicher Wellenlänge gebrachten Strahlung. Als Maß der Helligkeit dient die Stromstärke, mit der eine Glühlampe brennen muß, um in der betreffenden Farbe dieselbe Helligkeit wie der anvisierte glühende Körper zu geben.

Im einzelnen ist die Anordnung (Fig. 9) folgende: Das Objektiv L_1 eines einfachen Fernrohrs entwirft hinter dem Diaphragma D ein Bild der glühenden Fläche, deren Temperatur zu messen ist. Hinter dem Diaphragma befindet sich der Leuchtfaden einer kleinen Glühlampe (in der Figur um 90° gedreht). Durch die Linse L_2 mit ein oder zwei vorgesteckten roten Gläsern G wird gleichzeitig das Bild der leuchtenden Oeffnung und der Faden der Glühlampe beobachtet und die Stromstärke mit Hilfe eines Regulierwiderstandes W so lange vergrößert, bis der mittlere Teil des zunächst schwarz erscheinenden Fadens auf dem hellen Hintergrund

verschwindet. Zur Messung der Stromstärke dient ein Zeigergalvanometer S. Die von Siemens & Halske zu dem Apparat gelieferten Kohlefadenlampen sind für eine Spannung E von

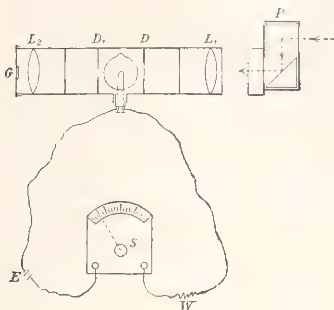


Fig. 9.

4 Volt eingerichtet. Damit keine zu schnelle Aenderung der Glühlampe eintritt, wird dieselbe nur bis 1400° C benutzt. Zur Messung von höheren Temperaturen werden als Lichtschwächung vor dem Beobachtungsrohr zwei Reflexionsprismen P (siehe Fig. 9) angebracht, an denen das Licht unter einem Einfallswinkel von 45° reflektiert und dadurch stark geschwächt wird und die so angeordnet sind, daß die Strahlen nur seitlich, aber nicht in ihrer Richtung verschoben werden. Bei der Prüfung in der Reichsanstalt werden die Lampenstromstärken i bei den Temperaturen t = 650°, 900°, 1150° und 1400° C eines anvisierten schwarzen Körpers bestimmt; sodann wird nach einem besonderen Ausgleichsverfahren (Meißner) eine von 100 zu 100° fortschreitende Tabelle für die Stromstärken berechnet, die einer quadratischen Formel $i = a + bt + ct^2$ entspricht. Die Eichung für hohe Temperaturen erfolgt in der Weise, daß bei einer konstanten Temperatur des schwarzen Körpers mit und ohne Reflexionsprismen beobachtet wird und aus der so gewonnenen Differenz der reziproken Werte der wahren und der scheinbaren, aus der Beobachtung mit Reflexionsprismen berechneten Temperatur, welche Differenz nach dem Wienschen Gesetz für monochromatisches Licht bei allen Temperaturen gleich groß ist, auch für andere scheinbare Temperaturen die wahren Temperaturen berechnet werden. Diese wahren, bei Benutzung der Reflexionsprismen geltenden Temperaturen werden dann in der Eichtabelle neben die zugehörigen Stromstärken außer den ohne Reflexionsprismen geltenden Temperaturen eingetragen. — Die Anzeige des Holborn-Kurlbaum-Pyrometers ist von der Entfernung des anvisierten Objektes unabhängig, sofern dasselbe nur durch entsprechende Einregulierung des Objektivs genau genug am Orte des Glühlampenfadens abgebildet wird. Da auch die Lichtschwächung durch das Objektiv bei verschiedenen Exemplaren genügend übereinstimmt, können die Glühlampen in beliebigen Beobachtungsrohren benutzt werden. Die Reflexionsprismen aber müssen stets für ein und dasselbe Instrument und stets mit den zugehörigen roten Gläsern benutzt werden, da eine andere Orientierung zum Beobachtungsrohre und eine Beobachtung in etwas anderen Farben hier zu wesentlichen Fehlern Veranlassung gibt.

Bei dem optischen Pyrometer nach Wanner erfolgt die Monochromatisierung des Lichts nicht durch farbige Gläser, sondern durch spektrale Zerlegung. Das Pyrometer ist im wesentlichen ein König-Martenssches Spektralphotometer (vgl. den Artikel „Photometrie"), bei dem die spektral zerlegten Strahlen des anvisierten Objektes und einer Vergleichshelligkeit, die je eine Hälfte des Gesichtsfeldes erhellen, zunächst senkrecht zueinander polarisiert und sodann durch ein drehbares Nicholsches Prisma geschwächt werden. Um das Photometer handlicher und als Pyrometer brauchbarer zu machen, hat Wanner dasselbe mit einem sogenannten gradsichtigen, d. h. die Strahlen nicht ablenkenden Dispersionsprisma versehen, so daß die Achse des Instruments nicht geknickt ist, und außerdem eine Glühlampe fest am Photometer montiert. Die Glühlampe wird mit konstantem Strom gebrannt und die von der Glühlampe und von dem anvisierten Objekt beleuchteten beiden Gesichtsfeldhälften werden durch Drehung des Nicholschen Prismas auf gleiche Helligkeit gebracht. Um unabhängig von Aenderungen der Glühlampe zu sein, wird dem Pyrometer als konstante Helligkeitsquelle eine Amylacetatlampe mit Mattscheibe und Visier zur Einregulierung der Flammenhöhe beigegeben, durch welche die Stromstärke, mit der die Lampe brennen muß, stets von neuem ermittelt werden kann. Das Wanner-Pyrometer hat gegenüber dem Holborn-Kurlbaum-Pyrometer den Nachteil, daß es wegen der starken Lichtschwächung durch die Polarisationseinrichtungen und vielen reflektierenden Flächen erst oberhalb 900° C brauchbar ist; dagegen besitzt es den Vorteil, daß zwischen Temperatur und Winkeleinstellung des Nicholschen Prismas nicht nur ein empirischer, sondern ein durch das Wiensche Energieverteilungsgesetz und die Formel für die Lichtschwächung durch Nicholsche Prismen bestimmter, rechnerisch zu ermittelnder Zusammenhang besteht. Dies macht sich auch bei der Eichung geltend, indem nur bei einer einzigen Temperatur des anvisierten Hohlraumstrahlers die Winkelstellung des Nichols ermittelt zu werden braucht, während die zu anderen Winkeleinstellungen gehörigen Temperaturen daraufhin berechnet werden können.

Bei der Eichung in der Reichsanstalt wird die Stromstärke der Glühlampe so einreguliert, daß der Einstellung des Nichols auf 45° die Tem-

peratur 1200° C entspricht, und sodann die „Normalzahl“ ermittelt, d. h. die Winkelstellung des Nichols, auf welche bei der Beobachtung der Helligkeit der Amylacetatlampe eingestellt werden muß, um die richtige Stromstärke der Glühlampe zu bestimmen. Entspricht der Winkel 45° bei allen Pyrometern der Temperatur 1200° C, so kann neben der Winkelteilung bei allen Pyrometern die gleiche Temperaturskale angebracht werden, so daß die Temperaturen direkt abgelesen werden können. — Da bei größeren Winkeln als etwa 80° die Einstellung des Nichols zu ungenau wird, ist das Wanner-Pyrometer direkt nur bis zu der diesem Winkel entsprechenden Temperatur von etwa 1650° C brauchbar. Soll das Pyrometer für höhere Temperaturen benutzt werden, so wird vor die vom anvisierten Objekt beleuchtete Spalthälfte ein Rauchglas gesetzt. Die durch dasselbe hervorgerufene Lichtschwächung wird durch Vergleich mit einem rotierenden Sektor bestimmt und darauf mit Hilfe des Wienschen Gesetzes berechnet, welche wahren Temperaturen den mit Rauchglas erhaltenen, an der ohne Rauchglas gültigen Temperaturskala abgelesenen Temperaturen entsprechen; eine entsprechende Tabelle wird in den Eichschein aufgenommen.

Das Heningsche Spektralpyrometer ist ein Pyrometer nach dem Holborn-Kurlbaumschen Prinzip bei dem die Monochromatisierung des eintretenden Lichtes aber wieder statt durch farbige Gläser durch spektrale Zerlegung erfolgt. Dadurch besitzt der Apparat für manche wissenschaftliche Zwecke gegenüber dem ursprünglichen Holborn-Kurlbaumschen Vorzüge, während er andererseits nicht bis zu so tiefen Temperaturen wie das letztere Pyrometer brauchbar ist.

Auf andere, im Ausland in Gebrauch befindliche optische Pyrometer wie das Le Chateliersche Pyrometer und das Férysche Absorptionspyrometer kann hier nicht eingegangen werden.

Unter den Strahlungspyrometern im engeren Sinne, bei denen keine optischen Methoden benutzt werden, sind vor allem die Pyrometer Féryscher Konstruktion zu nennen. Bei den wichtigsten Formen derselben wird die Strahlung, ohne spektral zerlegt zu werden, auf der Lötstelle eines Thermoelements vereinigt, aus dessen Anzeige auf die Temperatur des strahlenden Körpers geschlossen wird. Die Pyrometer besitzen gegenüber den optischen Pyrometern den Vorteil, daß sie bis zu Temperaturen von 400° C herab benutzbar sind und daß ihre Anzeigen wie die der gewöhnlichen Thermoelemente registriert werden können. Dagegen erfordern die Féryschen Pyrometer eine ziemlich große Oeffnung des strahlenden Körpers; ferner müssen sie an mehreren Punkten empirisch geeicht werden, da die Bedingungen für die strenge Anwendbarkeit des Stefanschen Strahlungsgesetzes, das ihnen im Prinzip zugrunde liegt, bei den Instrumenten nicht hinreichend erfüllt sind.

Die am meisten gebräuchliche Form des Féryschen Pyrometers besitzt folgende Anordnung (Fig. 10): Die durch die Oeffnung eines

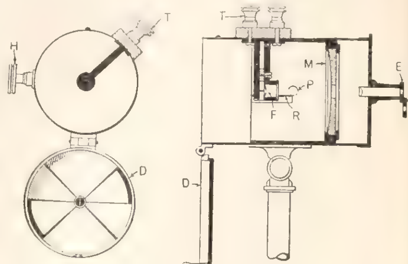


Fig. 10.

Hohlzylinders fallende Strahlung wird durch einen vergoldeten Hohlspiegel M, der in der Achse des Hohlzylinders durch den Zahnstangentrieb HPR verschiebbar ist, auf die geschwärzte, kreisförmige Lötstelle eines Thermoelements (bei F) geworfen, dessen Drähte zu 2 Anschlußklammern T an der Außenseite des Hohlzylinders führen. Durch eine Durchbohrung des Spiegels und ein vor derselben angebrachtes Okular E kann man beobachten, ob die Lötstelle im Bildpunkte der strahlenden Oeffnung liegt und ob sie, wie erforderlich ist, von dem Bilde ganz ausgefüllt ist. Ersteres wird durch Verschieben des Hohlspiegels erreicht und daran erkannt, daß das Bild der strahlenden Oeffnung, das man in zwei, die Lötstelle umgebenden, gegeneinander geneigten Spiegeln sieht, ununterbrochene Konturen hat. Das Zeigergalvanometer, das an die Anschlußklemmen des Thermoelements angeschlossen wird, kann mit einer Temperaturskale und mit einer Registriervorrichtung versehen werden. Um die Meßgenauigkeit bei gegebener Skalenlänge möglichst groß zu machen, kann man ein Galvanometer mit zwei Meßbereichen anwenden. Erstreckt sich der erste etwa von 400 bis 1100° C, so wird bei der Messung höherer Temperaturen vor die Oeffnung des Pyrometerrohrs ein Diaphragma D mit sektorförmigem Ausschnitt geklappt (Fig. 10). Durch diese Verkleinerung der Oeffnung geht der Ausschlag des Galvanometers erheblich zurück und es können die höheren Temperaturen, etwa die Temperaturen bis 1400° C jetzt an der für den 2. Meßbereich gültigen Teilung der Skale abgelesen werden.

Bei dem Fosterschen Strahlungspyrometer ist der Hohlspiegel nicht verschiebbar, sondern das Thermoelement befindet sich dauernd an dem Ort, wo die Oeffnung des Pyrometerrohrs durch den Spiegel abgebildet wird, was zwar eine Vereinfachung ist, aber sehr große Anforderungen an die Oeffnung des strahlenden Körpers stellt.

Weiteres über die Methoden der Strahlungsmessung, z. B. über die Bestimmung der für die Temperaturmessung überaus wichtigen Exponentialkonstanten c des Wien-Planckschen Strahlungsgesetzes siehe im Artikel „Strahlungsmessung“.

7. Verschiedene Temperaturmeßgeräte. Ueber andere, im vorhergehenden nicht behandelte Methoden der Temperaturmessung mag Folgendes Erwähnung finden:

Das Stocksche Dampfdruckthermometer beruht darauf, daß über jeder, in einem abgeschlossenen Raum befindlichen Flüssigkeit bei einer bestimmten Temperatur ein bestimmter Dampfdruck vorhanden ist. Wenn also für eine Substanz einmal der Zusammenhang zwischen Temperatur und Dampfspannung bestimmt ist, so kann aus der letzteren, die sich z. B. mit einem Quecksilbermanometer messen läßt, die Temperatur berechnet werden. Die Dampfdruckthermometer sind besonders für sehr tiefe Temperaturen , wo kondensierte Gase wie Sauerstoff und Wasserstoff verwendet werden, geeignet. Sie können dort an Stelle der Widerstandsthermometer benutzt werden.

Die Metallthermometer beruhen meist auf der Verschiedenheit der Wärmeausdehnung zweier Metalle, durch die eine Veränderung der Krümmung zweier an den Längsseiten miteinander verlöteter Metallstäbe, Metallspiralen oder dgl. hervorgerufen wird. Die so bei Temperaturänderungen entstehende Bewegung wird durch Hebelübersetzung oder dgl. in vergrößertem Maßstabe auf einen Zeiger übertragen, an dem die Temperatur nach vorhergehender empirischer Eichung abgelesen werden kann. Die Metallthermometer finden besonders bei Thermographen Verwendung, bei denen der schreibfederartig ausgebildete Zeiger meist mit einem kleinen Behälter für Farbflüssigkeit versehen ist und auf einer sich umdrehenden Papierrolle die Temperatur registriert.

Die Seegerkegel sind kleine Pyramiden, die aus einer Reihe verschiedener keramischer Materialien in der Weise zusammengesetzt sind, daß sie bei einer bestimmten Temperatur erweichen und dadurch umsinken. Sie werden von der Kgl. Porzellanmanufaktur in Berlin angefertigt für Temperaturen von 600 bis etwa 2000° C, wobei die Erweichungstemperaturen zweier aufeinanderfolgender Kegel sich im Mittel um etwa 20° C unterscheiden. Die Seegerkegel finden in keramischen Oefen Verwendung, wo sie vor anderen Pyrometern den Vorzug haben, daß die Nebenumstände, z. B. die Schnelligkeit der Erhitzung und die Ofengase auf sie annähernd in derselben Weise einwirken wie auf das zu brennende Gut. Der Moment des Umsinkens wird durch ein im Ofen angebrachtes Schauloch beobachtet.

Bei den kalorimetrischen Thermometern wird auf die Temperatur aus der Wärmemenge geschlossen, die ein an den Ort der zu messenden Temperatur gebrachter Probekörper (meist aus Metall) aufnimmt. Sie finden noch bisweilen in der Technik Anwendung.

8. Trägheit der Thermometer. Bis ein Thermometer die Temperatur der Umgebung oder bei Strahlungspyrometern die Temperatur des strahlenden Körpers anzeigt, vergeht eine gewisse Zeit, die von der Masse, spezifischen Wärme und Wärmeleitfähigkeit der thermometrischen Materialien und des umgebenden Mediums sowie von dem Bewegungszustand des letzteren abhängt.

Setzt man den Zustand des umgebenden Mediums als stets gleich voraus, so läßt sich die Temperaturanzeige T des Thermometers in Abhängigkeit von der Zeit t darstellen durch $T = T_0 . e^{-\frac{t}{k}}$, wobei e die Basis der natürlichen Logarithmen, T_0 die Anfangstemperatur zur Zeit t = 0 und k die „Trägheitskonstante“ des Thermometers ist.

Die letztere kann auf verschiedene Weise bestimmt werden, z. B. indem man die Zeit beobachtet, die vergeht, bis das plötzlich in eine Umgebung vor der Temperatur T_1 gebrachte Thermometer von der Temperatur T_0 die Temperatur $T_0 + \frac{T_1 - T_0}{2}$ angenommen hat. Die Temperatur der Umgebung erreicht das Thermometer der obigen Formel entsprechend erst nach unendlich langer Zeit. Wie lange es dauert, bis die Temperatur praktisch genau genug (z. B. bis auf 0,001° C) angenommen ist, läßt sich aus der Formel berechnen.

Ein und dasselbe Thermometer besitzt um so geringere Trägheit, je kräftiger das umgebende Medium bewegt wird. In Luft, wo die Trägheit der Quecksilberthermometer verhältnismäßig groß ist, kann man z. B. durch Schleudern des Thermometers eine schnellere Einstellung desselben bewirken, oder in vollkommener Weise dadurch, daß man wie bei den Assmannschen Aspirationsthermometern durch ein das Thermometer umgebendes Rohr einen starken Luftstrom treibt. Durch eine derartige Bewegung der Luft kann man sogar den Einfluß der Sonnenstrahlung unterdrücken, die sonst die Anzeige des Thermometers, das die zugestrahlte Wärme nicht schnell genug an die Umgebung abgibt, wesentlich erhöhen kann.

9. Fixpunkte und Thermostaten. Als Punkte, bei denen die Temperatur einen konstanten, bekannten Wert hat (Fixpunkte) dienen bei der Eichung von Temperaturmeßinstrumenten Schmelz- und Erstarrungspunkte, Siedepunkte und Umwandlungs-

punkte. Die Siedepunkte haben vor den anderen Fixpunkten den Vorteil, daß sich beim Sieden die Temperatur beliebig lange konstant halten läßt; dagegen muß bei den Siedepunkten die Abhängigkeit vom äußeren Druck berücksichtigt werden, wodurch sich allerdings andererseits die Möglichkeit ergibt, durch Variieren des äußeren Druckes verschiedene Temperaturen herzustellen. Wenn möglich, soll das zu prüfende Thermometer nur in den Dampf, nicht in die Flüssigkeit eintauchen, da letztere erhebliche Ueberhitzung aufweisen kann.

Bei der Prüfung von Thermometern an Schmelz- und Erstarrungspunkten wird, falls nicht wie bei Eis und Wasser größere Mengen des erstarrten und geschmolzenen Materials vermengt werden können, in folgender Weise verfahren: Um den Erstarrungspunkt zu beobachten, läßt man das geschmolzene Material, in welches das zu eichende Instrument eingetaucht wird, durch sorgfältige Einregulierung der Heizung, die am besten auf elektrischem Wege erfolgt, sich langsam abkühlen und beobachtet in gleichen Intervallen (etwa von ½ zu ½ Minute) die Anzeige des Thermometers. Sobald einzelne Teile des Materials zu erstarren beginnen, ändert sich die Temperatur so lange nicht mehr, bis alle Teile des Materials unter Abgabe der Schmelzwärme erstarrt sind, vorausgesetzt, daß die Gleichmäßigkeit der Außentemperatur und die Wärmeleitfähigkeit des benutzten Materials so groß ist, daß keine Temperaturdifferenzen im Innern des Materials auftreten können. Bei Schmelzpunktsbeobachtungen wird umgekehrt ein allmähliches Schmelzen durch geeignete Einregulierung der Heizung herbeigeführt. Der Eintritt der Temperaturkonstanz ist um so schärfer und Schmelz- und Erstarrungspunkt stimmen um so besser überein, je reiner die Materialien sind. Bei einzelnen Materialien tritt beim Erstarren eine Unterkühlung ein, die aber die Schärfe des Fixpunkts nicht beeinträchtigt, da die Temperatur alsbald nach Eintritt der Unterkühlung auf die Erstarrungstemperatur hinaufschnellt.

Bei der Beobachtung von Umwandlungspunkten wird ganz ähnlich wie bei Schmelz- und Erstarrungsversuchen verfahren. Auch hier wird durch den chemischen Prozeß, der in diesem Fall keinen anderen Aggregatzustand, sondern eine andere chemische Modifikation hervorruft, Wärme verbraucht oder abgegeben und dadurch bis zur Beendigung der Umwandlung Temperaturkonstanz hervorgerufen.

Erwähnt werden mag noch eine Methode der Schmelzpunktsbestimmung, die sogenannte Drahtmethode, die besonders bei Thermoelementen Verwendung findet: Zwischen die Thermoelementdrähte, deren Lötstelle entfernt ist, wird ein Drahtstückchen aus dem Schmelzmetall, das inoxydabel sein muß, zwischengeschmolzen und das Thermoelement langsam erhitzt, bis das Drahtstückchen durchschmilzt, was man am plötzlichen Verschwinden der Thermokraft, die man beobachtet, wahrnimmt. Auch bei dieser Methode kann man, was in der Literatur allerdings noch nicht mitgeteilt ist, mit feinen Meßinstrumenten die Konstanz der Temperatur aus der Konstanz der Thermokraft beobachten und den Zeitpunkt der Konstanz als Schmelzpunkt annehmen; das Durchschmelzen selbst findet erst bei einer etwas höheren Temperatur statt.

In der folgenden Tabelle sind die für die Thermometrie wichtigsten Fixpunkte aufgeführt:

Substanz	Vorgang	Temperatur °C (thermodyn. Skale)	Reproduzierbarkeit °C
Helium	Sieden	etwa −268,5	—
Wasserstoff	„	−252,7 ± 0,1	wenige Hundertstel
	„	+ 0,005 (p − 760)	„
Sauerstoff	„	−182,9 ± 0,1	„
	„	+ 0,013 (p − 760)	„
Kohlendioxyd	Sublimation	−78,5 ± 0,1	—
		+ 0,017 (p-760)	
Quecksilber	Erstarren	−37,7 ± 0,1	„
Eis	Schmelzen	0	0,001
Natriumsulfat	Umwandlung	32,384 ± 0,002	„
Wasser	Sieden	100 + 0,037 (p—760)	0,002
Naphthalin	„	218,0 ± 0,05	0,01
	„	+ 0,058 (p − 760)	
Benzophenon	„	305,9 ± 0,07	0,02
		+ 0,063 (p—760)	
Schwefel	„	444,5 ± 0,1	0,02
		+ 0,091 (p − 760)	
		− 0,00004 (p − 760)^2	
Antimon	Erstarren	630 ± 0,5	0,1
Silber	„	960 ± 1	
Gold	„	1063 ± 1	0,2
Kupfer	„	1083 ± 1	0,2
Palladium	Schmelzen	1551 ± 5	1
Platin	„	1750 ± ?	1
Wolfram	„	etwa 3000°	

Im einzelnen mag zu den Fixpunkten noch Folgendes bemerkt werden: Die kondensierten Gase unterhalb 0° C und der Kohlensäureschnee kommen zur Verminderung der äußeren Wärmezufuhr in Dewarschen Gefäßen zur Verwendung, d. h. doppelwandigen evakuierten Glasgefäßen, deren nach dem Vakuum zu gerichtete Oberflächen wenn möglich noch ganz oder zum Teil versilbert werden.

Für den Eisschmelzpunkt wird am besten geschabtes Eis, mit destilliertem Wasser vermengt, verwendet.

Bei den Wassersiedeapparaten ist der eigentliche Dampfraum von einem hohlen Mantel umgeben, durch den ebenfalls Dampf strömt. Die zu prüfenden Instrumente dürfen nie in das Wasser, sondern stets nur in den Dampf eingetaucht werden. Um eine Ueberhitzung des Dampfes im Dampfraum zu vermeiden, läßt man den Dampf am besten erst durch den Dampfmantel und dann in den Dampfraum strömen oder leitet ihn zunächst durch Wasser, das nicht direkt beheizt ist, oder erzeugt ihn in einem besonderen Kessel. Der Ueberdruck im Innern des Dampfraumes gegenüber dem atmosphärischen Druck wird an einem Wassermanometer abgelesen. Um sehr große Konstanz zu erzielen, muß man den Wasserkessel mit einem Oelbad oder auf elektrischem Wege heizen.

Fig. 11.

Naphthalin, Benzophenon und Schwefel werden in etwa 5 cm weiten und 50 cm langen Glasrohren aus Jenaer Glas 59 III zum Sieden gebracht. Die Beheizung, die sich nur auf den mit Flüssigkeit gefüllten Teil des Rohrs erstrecken darf, erfolgt mit Gas (Fig. 11) oder auf elektrischem Wege. Der obere Teil des Glasrohres muß mit einer Packung aus Asbest gegen zu starke Wärmeabgabe geschützt, und das eintauchende Thermometer durch eine Schutzhülle aus ausgeglühter Asbestpappe oder aus Eisenblech gegen Ausstrahlung geschützt werden. Näheres siehe bei Meißner „Zur Konstanz des Schwefelsiedepunkts". Um Springen der Rohre zu verhüten, muß man dieselben vor dem Erstarren des Schwefels usw. stark neigen oder noch besser die Substanz vor dem Erstarren ausgießen.

Für die Schmelzpunktsbestimmungen werden elektrische Schmelzöfen (Fig. 12) benutzt. Als Heizwiderstand dient eine Spirale aus Platinband von etwa 0,01 mm Dicke, die auf einen Hohlzylinder aus Porzellan oder besser Marquardtscher Masse gewickelt und mit etwas feuchter Masse an einigen Stellen angeheftet ist, (bis etwa 1200° C brauchbar) oder eine hohlzylinderförmige etwas dickere Platinfolie, die bis etwa 1600° C verwendbar ist, falls sie auf die Innenfläche des Hohlzylinders aus Marquardtscher Masse gelegt wird. In letzterem Fall ist für gute Stromverteilung durch dicke ringförmige Elektroden zu sorgen. Für noch höhere Temperaturen kommen Folien und Rohre aus Platin

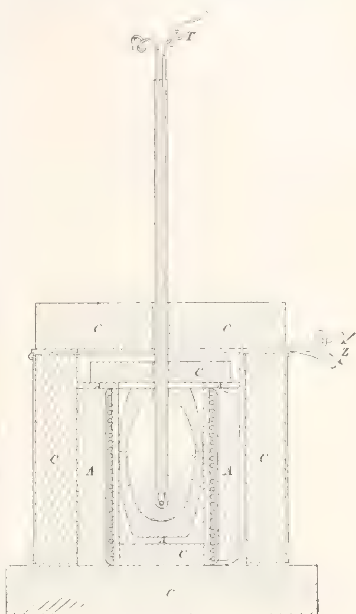


Fig. 12.

Rhodium, Iridium, Wolfram, Kohle zur Verwendung, wobei darauf zu achten ist, daß durch die Zerstäubung der Metalle und durch Kohlenoxydgas usw. nicht eine Verunreinigung der zu schmelzenden Substanz eintritt. Als Material für die Schmelztiegel dient Porzellan, Marquardtsche Masse, Magnesia, Kohle (für Substanzen, die reduzierende Atmosphäre brauchen), Platin (für Salze). Besonders empfehlenswert ist Marquardtsche Masse, die bei genügend starkwandigen Tiegeln bis etwa 1600° C brauchbar ist und an der die Schmelzmetalle nicht haften, so daß ein- und derselbe Tiegel wiederholt benutzt werden kann.

Für Schmelzpunktsbestimmungen nach der Drahtmethode können Oefen mit horizontal liegenden Rohren, z. B. schwarze Körper (siehe weiter unten) benutzt werden.

Um Thermometer bei Temperaturen, die zwischen den Fixpunkten liegen, miteinander vergleichen zu können, sind Bäder konstanter Temperatur (Thermostaten) erforderlich. Am vorteilhaftesten sind Thermostaten, die mit Flüssigkeiten beschickt

sind. Als Badflüssigkeit dient oberhalb 0° C: Wasser (bis nahe 100° C), Petroleum (bis etwa 50° C), Palmin (von 50 bis 250° C), hochsiedendes Oel (von 100 bis etwa 350° C), eine Mischung von Natron- und Kalisalpeter im Verhältnis der Molekulargewichte (von 250 bis etwa 600° C), eine Mischung von 22,25 Teilen Natrium- und 77,75 Teilen Bariumchlorid (von etwa 600 bis etwa 1400° C), Zinn (von 250 bis etwa 1000° C).

Die Heizung geschieht am besten auf elektrischem Wege. Als Widerstandsmaterial kommt bis 600° C Konstantendraht, bis 1100° Nickeldraht, für höhere Temperaturen Platin zur Verwendung. In die isolierenden Flüssigkeiten (Petroleum, Palmin, Oel) können die Heizwiderstände nackt eingetaucht werden; bei den anderen Bädern wird der Heizdraht auf die Außenwandung des Gefäßes, bei Metallgefäßen unter Aufbringung einer Zwischenlage aus Arbeitspapier gewickelt. In der Technik wird durch die Metallsalzbäder (in Gefäßen aus Chamotte) starker Wechselstrom niedriger Spannung zur Heizung des Bades direkt hindurch geschickt; für Präzisionszwecke ist dies nicht zweckmäßig. Die Verdampfung der Flüssigkeiten wird durch Deckel, die Wärmeabgabe durch die Wandungen hindurch durch wärmeisolierende Packungen aus Watte, Filz, Sand, Asbestwolle, Tonerde, Magnesia eingeschränkt. Vor allem ist eine gute Durchrührung der Badflüssigkeit erforderlich. Am besten dient hierzu ein Schraubenrührer, d. h. Schraubenflügel, die auf einer Achse angebracht sind und sich im Innern eines unten offenen und oben mit seitlichen Oeffnungen versehenen, in das Bad eingetauchten Hohlzylinders bewegen, so daß eine vollständige Kreisbewegung der Badflüssigkeit entsteht. Die Lagerung der Achse geschieht am besten außerhalb des Bades, der Antrieb durch einen Elektromotor mit Schnurtrieb.

Bei genügender Konstanz der Stromquelle läßt sich durch elektrische Heizung eine für alle Zwecke ausreichende Konstanz der Temperatur durch richtige Einregulierung des Heizstromes mittels eines Vorschaltwiderstandes erzielen. Auf die vielen, in der Literatur beschriebenen Vorrichtungen zur automatischen Einregulierung der Temperatur (Thermoregulatoren), die meist auf der Betätigung von Widerstandsschaltern oder Regulatoren für die Gaszufuhr durch sich ausdehnendes Quecksilber oder dgl. beruhen, mag deshalb hier nicht eingegangen werden.

Wegen des großen Bedarfs an elektrischer Energie und anderer experimenteller Schwierigkeiten bei Flüssigkeitsthermostaten kommen oberhalb 600° C meist Luftthermostaten zur Verwendung, d. h. abgeschlossene geheizte Lufträume. Wegen der geringen spezifischen Wärme der Luft ist es sehr schwer, in dem Luftraum genügend gleichmäßige Temperatur herzustellen. Day und Sosmann haben dies bei ihren gasthermometrischen Messungen in hohen Temperaturen (bei 1600° C) dadurch erreicht, daß sie die Enden des Ofens stärker als die Mitte beheizten, bis mit Thermoelementen an verschiedenen Stellen genügend gleiche Temperatur gefunden wurde.

Zu den Thermostaten für hohe Temperaturen sind auch die schwarzen Körper oder Hohlraumstrahler zu rechnen, bei denen ein elektrisch beheizter, meist mit Luft angefüllter Raum dazu verwendet wird, um die schwarze oder Hohlraumstrahlung zu erzeugen.

Um die Anforderungen an die Gleichmäßigkeit der Temperatur im Hohlraum herabsetzen zu können, wird derselbe in der Regel geschwärzt, so daß die anvisierte Rückwand auch ohne Hohlraum schon nahezu die schwarze Strahlung emittiert. Zur Schwärzung ist eine Mischung aus 50 Teilen Eisenoxyd, 50 Teilen Chromoxyd und 2 Teilen Marquardtscher Masse gut verwendbar. Bei dem Lummer-Kurlbaumschen schwarzen Körper (Fig. 13) ist der Hohlraum



Fig. 13.

durch mehrere Diaphragmen unterteilt, um im hintersten Teil eine möglichst gleichmäßige Temperatur zu erzielen. Die Temperatur des letzteren wird bei der Eichung von Strahlungspyrometern durch ein Le Chateliersches Thermoelement gemessen, dessen Schenkel durch die mit dem Pyrometer anvisierte Rückwand hindurchgeführt sind. Um Fehler durch Wärmeableitung zu vermeiden, sollten im Innern des Hohlraums sich außer der Lötstelle stets noch zwei spiralförmige Enden der Thermoelementenschenkel befinden. Statt des Lummer-Kurlbaumschen schwarzen Körpers kann man nach dem Vorgange von Brodhun, Rothe, Hoffmann einen zusammensetzbaren Körper benutzen, bei dem einzelne Trommeln mit Diaphragmen in ein glattes Marquardtrohr hineingeschoben sind, so daß man die Oeffnung des Hohlraums stets dem vorliegenden Zweck entsprechend wählen kann. Durch geeignete Konstruktion konnten Hoffmann und Meißner einen solchen, mit Platinfolie beheizten schwarzen Körper bis 1600° C brauchbar machen. Von denselben wurden ferner für optisch-pyrometrische Messungen nahezu kugelförmige Hohlkörper aus Marquardtscher Masse von etwa 2 cm Durchmesser verwendet, die in geschmolzenes Kupfer, Gold und Palladium eintauchten, wodurch sich außerordentliche Konstanz und Gleichförmigkeit der Temperatur bei Beobachtung an den Schmelzpunkten im Hohlraum erzielen ließ, so daß eine Schwärzung der Strahler nicht notwendig war. Die strahlende Oeffnung betrug nur wenige qmm und wurde durch eine Linse auf dem Spalt des zur Messung verwandten Photometers abgebildet. Oberhalb 1600° C kommen schwarze Körper aus Magnesiarohren im Innern von Iridiumrohren zur Verwendung, bei denen

die Temperaturmessung mit Iridium-Iridium-Rhuteniumelementen erfolgen kann, sowie schwarze Körper aus Kohlerohren mit eingeschobenen Kohlediaphragmen, die gleichzeitig als Heizrohre und als Strahler dienen, deren Temperatur aber nicht mit Thermoelementen, sondern durch Strahlungsmessungen ermittelt wird. Unter den letzteren ist besonders der Vakuumstrahler von Warburg und Leithäuser hervorzuheben, bei dem das Kohlerohr im Vakuum glüht und die Strahlung durch ein Flußspatfenster austritt.

Bei Thermostaten für Temperaturen unter 0° C kann als Badflüssigkeit Petroläther bis etwa —150° C und noch etwas tiefer hinab technisches Pentan verwendet werden. Die Abkühlung kann nach dem Vorgange von Rothe mit flüssiger Luft erfolgen, die in eine das Bad durchsetzende Glasröhre strömt. Neuerdings ist diese Methode von Henning so verfeinert worden, daß sie den höchsten Ansprüchen an Konstanz der Temperatur genügt. Die flüssige Luft wird dabei mit einem Vakuumheber (doppelwandiger, evakuierter, versilberter Heber), der in die Flasche mit flüssiger Luft mittels Gummistopfens luftdicht eingesetzt ist, durch den Dampfdruck der flüssigen Luft in eine in den Petroläther tauchende Glasspirale tropfenweise übergehebert. Die Konstanz der pro Zeiteinheit übergeheberten Menge flüssiger Luft wird dadurch erzielt, daß in der Flasche mit flüssiger Luft ein bestimmter Druck hergestellt wird, indem aus dem Innern derselben ein Rohr geführt ist, das in eine Wassersäule von einregulierbarer Höhe taucht, durch welche die verdampfende Luft entweicht, wenn ihr Druck den der Wassersäule überschreitet. Unterhalb —150° C kann man als Bäder konstanter Temperatur flüssigen Sauerstoff, flüssige Luft und flüssigen Wasserstoff verwenden. — Kamerlingh Onnes benutzt für Thermostaten unter 0° C überhaupt nur kondensierte Gase und läßt dieselben zur Erzielung verschiedener Temperaturen unter verschiedenen Drucken sieden. Er verwendet insbesondere Methylchlorid (—24 bis —88° C), Aethylen (—108 bis —159° C), Aethan (—165 bis —180° C), Luft (—193 bis —210° C), Wasserstoff (—253 bis —259° C), sowie Helium (—268 bis —272° C), dessen Herstellung anderwärts noch nicht erfolgt ist. Mit Hilfe des Heliums kann man also an den absoluten Nullpunkt bis auf etwa 1° herankommen.

Literatur. ***Landolt-Börnstein***, *Physikalisch-Chemische Tabellen. 4. Aufl., 1912. Abschnitte über Dichte, Schmelz- und Siedepunkte usw., Kältemischungen und Erzeugung konstanter Temperaturen, Thermometrie, Sättigungs- und Reaktionsdrucke. Dort sind auch die einschlägigen Einzelarbeiten aufgeführt (besonders S. 104 bis 104e).* — ***Burgess and Le Chatelier***, *The Measurement of High Temperatures, New York 1912. Mit ausführlichem Literaturverzeichnis. Erscheint demnächst auch in deutscher Ausgabe.* — ***M. Planck***, *Vorlesungen über Thermodynamik. 3. Aufl. Leipzig 1911. Allgemeines über Temperatur und thermodynamische Skale. — Neueste Arbeiten siehe in „Fortschritte der Physik", Braunschweig, Jahrgang 1912 und folgende.*

W. Meissner.

Thiedemann

Friedrich.

Geboren am 23. August 1781 in Cassel, gestorben am 22. Januar ~~[illegible]~~ in München, studierte in Marburg 1798, später 1802 in Bamberg und Würzburg. Er promovierte 1804 in Marburg und habilibierte sich hier auch für Physiologie. Zu seiner weiteren naturwissenschaftlichen Ausbildung studierte er in Paris noch Anatomie, Zoologie und Physiologie. Schon 1805 erhielt er einen Ruf als ordentlicher Professor der Anatomie und Zoologie an die Universität Landshut, wo er 11 Jahre lang eine segensreiche Tätigkeit entfaltete. 1816 ging er nach Heidelberg, wo er 1844 die Erbauung eines anatomischen Theaters veranlaßte, dessen Vollendung er noch zu seiner Freude erlebte. 1849 zog er sich infolge des badischen Aufstandes, an dem auch zwei seiner Söhne teilnahmen, vom Lehramt zurück und lebte in Frankfurt a/M., später in München, wo er auch starb. Zu seinen frühesten Arbeiten gehören zahlreiche Monographien vergleichend-anatomischen Inhalts, über die Anatomie der Strahltiere, des Fischherzens, der kopflosen Mißgeburt, besonders die berühmte Schrift: Anatomie und Bildungsgeschichte des Gehirns im Fötus des Menschen nebst einer vergleichenden Darstellung des Hirnbaues bei den Tieren (Nürnberg 1876). Auch auf dem Gebiet der Physiologie leistete er Bedeutendes. Am bekanntesten sind hier seine Arbeiten über physiologische Chemie, z. B. die Verdauung. Von einem großartig und umfassend angelegten Werke „Physiologie des Menschen" erschien nur Teil 1 (Darmstadt 1830 1. Bd.) und Teil 3 (1836 ebd.). — Unvollendet ist ebenfalls „Zoologie" (1. bis 3. Teil Landshut, Heidelberg 1808 bis 1814).

1861.

Ein vollständiges bis zum Jahre 1844 reichendes Verzeichnis seiner Schriften gibt Callisen, Med. Schriftstellerlexikon. Hierzu kommt noch die 1854 erschienene Geschichte des Tabaks und anderer ähnlicher Genußmittel (Frankfurt).

Mit Reinhold und Treviranus gab er von 1824 bis 1827 die Zeitschrift für Physiologie heraus.

Literatur. ***A. Hirsch***, *Geschichte der medizinischen Wissenschaften in Deutschland. Biogr. Lexikon,* V. — *Allgem. deutsche Biographie, Bd.* 38, *1894 (Pagel.).* — ***P. L. W. Bischoff***, *Gedächtnisrede auf Friedrich Thiedemann. München 1861.*

W. Harms.

Thio- und Sulfoverbindungen.

1. Begriff und Einteilung. 2. Anorganische Thio- und Sulfoverbindungen. 3. Organische Thioverbindungen: a) Alkylsulfhydrate oder Merkaptane (Thioalkohole und Thiophenole) b) Alkylsulfide oder Thioäther. c) Disulfide und Polysulfide. d) Thioaldehyde und Thioketone. e) Thiosäuren. Thioderivate der Kohlensäure (Thioharnstoffe, Senföle usw.). 4. Organische Sulfoverbindungen: a) Sulfoniumverbindungen. b) Sulfoxyde. c) Sulfone, Disulfone und Trisulfone. d) Sulfinsäuren und deren Ester. e) Additionsverbindungen der Hydroschwefligen Säure und der Sulfoxylsäure. f) Sulfosäuren und deren Ester. g) Ester der Schwefligen Säure, Alkylschweflige Säuren und Natriumbisulfitverbindungen der Aldehyde und Ketone. h) Thiosulfonsäuren und deren Ester (Alkyldisulfoxyde). i) Ester der Schwefelsäure und Aetherschwefelsäuren (Dialkylsulfate). k) Alkylthioschwefelsäuren. Anhang: Beschreibung wichtiger Thio- und Sulfoverbindungen.

1. Begriff und Einteilung. Der Begriff der Thio- und Sulfoverbindungen umfaßt im weitesten Sinne alle schwefelhaltigen Verbindungen überhaupt. Ist in einer solchen Verbindung neben dem Schwefel und beliebigen anderen Elementen auch Kohlenstoff vorhanden, so liegt eine organische, in jedem anderen Falle eine anorganische Thio- oder Sulfoverbindung vor. Da die anorganischen Schwefelverbindungen in dem Artikel „Schwefel“ ausführlich behandelt werden, soll hier im wesentlichen nur von den organischen Schwefelverbindungen die Rede sein. Zwischen den beiden Begriffen Thioverbindung und Sulfoverbindung ist namentlich früher nicht streng unterschieden worden, so daß man z. B. die gleiche Verbindung sowohl als Thioharnstoff wie als Sulfoharnstoff bezeichnet. In neuerer Zeit jedoch ist es gebräuchlich geworden, zwischen Thio- und Sulfoverbindungen im allgemeinen in folgendem Sinne zu unterscheiden.

Der Schwefel ähnelt als zweiwertiges Element dem Sauerstoff und bildet eine dem Wasser entsprechende Wasserstoffverbindung H_2S, den Schwefelwasserstoff. Man bezeichnet nun im besonderen als Thioverbindungen alle Körper, die sich vom Schwefelwasserstoff durch teilweisen oder vollständigen Ersatz des Wasserstoffs durch kohlenstoffhaltige Gruppen ableiten, d. h. alle organischen Verbindungen des zweiwertigen Schwefels vom Typus $S\begin{smallmatrix}X\\Y\end{smallmatrix}$.

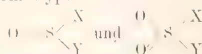
Die einfachsten derartigen Verbindungen sind die Alkylsulfhydrate oder Merkaptane



und die Alkylsulfide oder Thioäther



Während aber der Schwefel einerseits dem Sauerstoff ähnelt, zeigt er andererseits viel stärker als dieser die Neigung Verbindungen höherer Valenzstufen einzugehen. So liefert der Schwefel namentlich in Verbindung mit Sauerstoff eine große Anzahl von Derivaten, in denen er vier- oder sechswertig auftritt, d. h. Verbindungen vom Typus



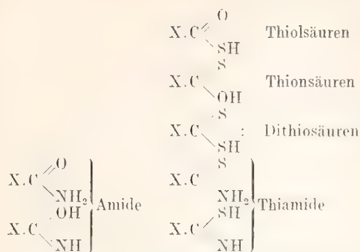
Organische Verbindungen dieser beiden Arten, in denen also X oder Y bezw. X und Y kohlenstoffhaltige Gruppen sind, bezeichnet man als Sulfoverbindungen. Diese Bezeichnung umfaßt also alle organischen Verbindungen des vier- und sechswertigen Schwefels.

Wie aus der vorher gegebenen Definition der Thioverbindungen hervorgeht, kann man dieselben durchweg als Derivate des Schwefelwasserstoffs auffassen. Andererseits kann man sich aber fast alle Verbindungen des zweiwertigen Schwefels aus analog gebauten Sauerstoffverbindungen dadurch entstanden denken, daß der Sauerstoff dieser Verbindungen durch Schwefel ersetzt worden ist. Da nun die entsprechenden Sauerstoffverbindungen sehr viel wichtiger sind als die schwefelhaltigen Analoga, und da außerdem infolge der großen Aehnlichkeit des zweiwertigen Schwefels mit dem Sauerstoff der Charakter der Verbindungen bei dem gedachten Ersatz meist nicht wesentlich verändert wird, ist es zweckmäßiger, die Thioverbindungen als „geschwefelte“ oder „Thio“-Derivate der betreffenden Sauerstoffverbindungen dadurch zu bezeichnen, daß man deren Namen die Benennung „Thio“ (oder, wie schon erwähnt, zuweilen auch weniger gut „Sulfo“) voranschickt.

Diese Bezeichnungsweise ergibt sich aus folgender Zusammenstellung, in der X und Y beliebige Kohlenwasserstoffreste (Alkylgruppen)[1]) bedeuten:

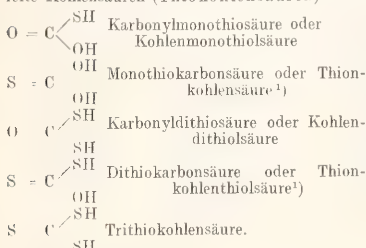
XOH: Alkohole und Phenole	XSH: Thioalkohole (Thiole) und Thiophenole
$\begin{smallmatrix}X\\Y\end{smallmatrix}>O$: Aether	$\begin{smallmatrix}X\\Y\end{smallmatrix}>S$: Thioäther
$\begin{smallmatrix}H\\X\end{smallmatrix}>C=O$: Aldehyde	$\begin{smallmatrix}H\\X\end{smallmatrix}>C=S$: Thioaldehyde (Thiale)
$\begin{smallmatrix}X\\Y\end{smallmatrix}>C=O$: Ketone	$\begin{smallmatrix}X\\Y\end{smallmatrix}>C=S$: Thioketone (Thione)
$X.C\begin{smallmatrix}O\\OH\end{smallmatrix}$: Säuren	Thiosäuren

[1]) In diesen Artikel werden aliphatische Kohlenwasserstoffreste als Alphyl-, aromatische als Arylgruppen bezeichnet, während die Benennung Alkyl- alle möglichen Arten zusammenfaßt. Abkürzungen: Alph-, Ar- und Alk-.



Zu diesen Verbindungen gehören auch die geschwefelten Analoga der hypothetischen Kohlensäure O=C(OH)(OH).

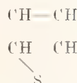
Von der Kohlensäure leiten sich fünf geschwefelte Kohlensäuren (Thiokohlensäuren) ab.



Bei den Thiokohlensäuren werden dann naturgemäß deren Derivate, wie Schwefelkohlenstoff, Thioharnstoffe, Rhodanverbindungen u. a., abgehandelt, die ja zu diesen Säuren im gleichen Verhältnis stehen wie Kohlendioxyd, Harnstoffe und Isocyanate zur gewöhnlichen Kohlensäure.

Zu diesen Thioverbindungen, welche als Analoga entsprechender Sauerstoffverbindungen anzusehen sind, kommen aber noch andere Verbindungen, deren Existenz auf die Neigung der Schwefelatome zurückzuführen ist, sich miteinander zu verketten. Es sind dies die Disulfide von der allgemeinen Formel X—S—S—Y und die allerdings nur wenig bekannten Tri- und Tetrasulfide, die man als Polysulfide zusammenfaßt. Ebenso wie man die Thioäther Alk—S—Alk als Alkyläther des Schwefelwasserstoffs H—S—H auffassen kann, betrachtet man die Disulfide Alk—S—S—Alk als Alkylverbindungen des Wasserstoffpersulfids H—S—S—H. Analoge Alkylverbindungen des Wasserstoffsuperoxyds H—O—O—H, die Alkylperoxyde, sind zwar auch bekannt, sind aber sehr viel unbeständiger und weniger wichtig.

Außerdem sind noch zahlreiche Thioverbindungen bekannt, in denen der zweiwertige Schwefel als Glied eines geschlossenen Ringes vorhanden ist, wie z. B. das wichtige Thiophen.



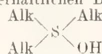
Alle derartigen Verbindungen werden aber nicht hier, sondern in dem Artikel „Heterocyklische Verbindungen" behandelt.

Den Thioverbindungen, d. h. den Verbindungen des zweiwertigen Schwefels, stehen, wie schon gesagt, die Sulfoverbindungen als Verbindungen des vier- oder sechswertigen Schwefels gegenüber. Die Neigung in höheren Valenzstufen aufzutreten, zeigt der Schwefel in sehr viel ausgeprägterem Maße als der Sauerstoff, so daß die den Sulfoverbindungen entsprechenden reinen Sauerstoffverbindungen nicht bekannt sind.

Die Tendenz des Schwefelatoms, eine höhere Valenzstufe anzunehmen, zeigt sich z. B. darin, daß die Thioäther Alk—S—Alk imstande sind, Halogenalkyle zu addieren, indem der Schwefel vierwertig wird.



Dieser Vorgang ähnelt der Bildung der quartären Ammoniumsalze aus den tertiären Aminen (vgl. den Artikel „Ammoniakderivate" Bd. I S. 270). Man bezeichnet die so entstehenden Verbindungen daher analog als Sulfoniumsalze und die daraus erhältlichen Basen



als Sulfoniumhydroxyde. Weniger gut ist die Benennung „Sulfinverbindungen" für dieselben Körper.

Sehr viel wichtiger als dieser Uebergang des zweiwertigen Schwefelatoms in ein vierwertiges, ist die Fähigkeit des zweiwertigen Schwefels, bei der Oxydation zunächst ein Atom Sauerstoff unter Uebergang in vierwertigen, und schließlich zwei Atome Sauerstoff unter Uebergang in wahrscheinlich sechswertigen Schwefel aufzunehmen. So liefern die Thioäther oder Alkylsulfide zunächst Sulfoxyde



und schließlich Sulfone



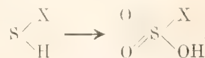
[1]) Anstatt der Bezeichnung „Thion" für das doppelt gebundene Schwefelatom gebraucht man auch zuweilen die Vorsilbe „Sulf" im Gegensatz zu „Thio" oder „Thiol" für einfach gebundenen Schwefel, spricht also von Sulfkohlensäure und Sulfthiokohlensäure.

für welche letzteren übrigens auch, jedoch mit geringerer Wahrscheinlichkeit die vom vierwertigen Schwefel abgeleitete Formel



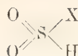
vorgeschlagen worden ist.

Auch das Schwefelatom der Thioalkohole nimmt bei energischer Oxydation Sauerstoff auf, indem sogenannte **Sulfonsäuren** oder **Sulfosäuren** entstehen.



Auf anderem Wege lassen sich auch Verbindungen erhalten, die um ein Atom Sauerstoff ärmer sind

Anhydrid	Hydrat	Monoalkylderivate		Dialkylderivate
(S (Schwefel))	[$\mathrm{S{<}^{OH}_{H}}$ oder $\mathrm{O{=}S{<}^{H}_{H}}$]			$\mathrm{O{=}S{<}^{Alk}_{Alk}}$ Sulfoxyde
[O=S]	[$\mathrm{O{=}S{<}^{OH}_{H}}$ oder $\mathrm{O_2S{<}^{H}_{H}}$] Sulfoxylsäure		$\mathrm{O{=}S{<}^{OH}_{Alk}}$ oder $\mathrm{O_2S{<}^{Alk}_{H}}$ Sulfinsäuren	$\mathrm{O{=}S{<}^{OAlk}_{Alk}}$ Aromat. Sulfinsäureester; $\mathrm{O_2S{<}^{Alk}_{Alk}}$ Sulfone
$\mathrm{O_2S}$ Schwefeldioxyd	$\mathrm{O_2S{<}^{OH}_{H}}$ oder $\mathrm{O{=}S{<}^{OH}_{OH}}$ Schweflige Säure	$\mathrm{O_2S{<}^{OAlk}_{H}}$ Alkylschweflige Säuren oder $\mathrm{O{=}S{<}^{OAlk}_{OH}}$	$\mathrm{O_2S{<}^{OH}_{Alk}}$ Sulfosäuren	$\mathrm{O_2S{<}^{OAlk}_{Alk}}$ Ester der Sulfosäuren; $\mathrm{O{=}S{<}^{OAlk}_{OAlk}}$ Ester der schwefligen Säure
	$\mathrm{O_2S{<}^{SH}_{H}}$ Thionschweflige Säure		$\mathrm{O_2S{<}^{SH}_{Alk}}$ Thiosulfonsäuren	$\mathrm{O_2S{<}^{SAlk}_{Alk}}$ Alkyldisulfoxyde oder Thiosulfonsäureester
$\mathrm{O_2S{=}O}$ Schwefeltrioxyd	$\mathrm{O_2S{<}^{OH}_{OH}}$ Schwefelsäure	$\mathrm{O_2S{<}^{OAlk}_{OH}}$ Alkylschwefelsäuren oder Aetherschwefelsäuren		$\mathrm{O_2S{<}^{OAlk}_{OAlk}}$ Alkylsulfate. Ester der Schwefelsäure
	$\mathrm{O_2S{<}^{SH}_{OH}}$ Thioschwefelsäure		$\mathrm{O_2S{<}^{SAlk}_{OH}}$ Alkylthioschwefelsäuren	



und als **Sulfinsäuren** bezeichnet werden.

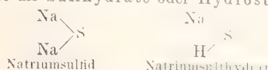
Diese und andere weniger wichtige Sulfoverbindungen kann man wiederum als Alkylderivate entsprechender Wasserstoffverbindungen (der verschiedenen Schwefelsäuren) auffassen.

Diesen Zusammenhang, von dem später (S. 1152ff.) noch etwas ausführlicher die Rede sein wird, zeigt die Zusammenstellung auf S. 1150, in der die in freiem Zustand nicht bekannten Verbindungen in eckige Klammern eingeschlossen sind. Zu den Formeln der Schwefelsäuren ist noch zu bemerken, daß sich für manche derselben zwei verschiedene Formeln aufstellen lassen, die zueinander im Verhältnis **tautomerer Modifikationen** stehen (vgl. z. B. den Artikel „**Ammoniakderivate**" Bd. I S. 278). Wenn nun auch diese Säuren als solche nur in einer Form bekannt sind, die entweder einer der beiden tautomeren Formeln entspricht oder für die sich zwischen beiden Formeln nicht sicher entscheiden läßt (vgl. z. B. S. 1152), so kennt man doch häufig von beiden Formen Alkylderivate, die untereinander völlig verschiedene Eigenschaften haben.

Kann man so alle Sulfoverbindungen gleichartig als Alkylderivate oder Aether der verschiedenen Schwefeloxydhydrate auffassen, so zeigen dieselben doch eine wichtige grundlegende Verschiedenheit in ihrem Verhalten gegen verseifende Agentien, je nachdem die Alkylgruppe **direkt** an das oxydierte Schwefelatom gebunden ist oder mit ihm durch Vermittelung eines Sauerstoffs (oder eines zweiwertigen Schwefelatoms) in Verbindung steht. Im ersteren Falle ist die Bindung eine außerordentlich feste, während im zweiten Falle Verseifung, d. h. Ersatz der Alkylgruppe durch Wasserstoff eintritt. Dies Verhalten ist wichtig für die Bestimmung der Konstitution der Sulfoverbindungen und der ihnen zugrunde liegenden Schwefeloxydhydrate. Die verseifbaren Alkylverbindungen bezeichnet man als **Ester** der betreffenden zugrunde liegenden Säure, während die unverseifbaren Verbindungen spezielle Namen führen.

2. Anorganische Thio- und Sulfoverbindungen. Von den anorganischen Schwefelverbindungen soll an dieser Stelle nur insoweit die Rede sein, als dies zum Verständnis der organischen Derivate nötig ist. Alles Nähere findet sich in dem Artikel „**Schwefel**".

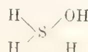
Die wichtigste Verbindung des zweiwertigen Schwefels ist der **Schwefelwasserstoff** H—S—H. Der in vulkanischen Gasausströmungen und Schwefelwässern vorkommende und bei der Fäulnis von Eiweißstoffen entstehende Schwefelwasserstoff ist ein farbloses, sehr giftiges Gas, dessen unangenehmer Geruch von faulen Eiern her bekannt ist. Er ist brennbar, unterhält aber die Verbrennung nicht. Seine wichtigste Eigenschaft ist, daß er sich bei Gegenwart von Wasser wie eine schwache zweibasische Säure verhält. Er rötet blaues Lackmuspapier und bildet zwei Reihen von Salzen: **Normale** Salze, in denen beide Wasserstoffatome, und **saure** Salze, in denen nur ein Wasserstoffatom durch Metall ersetzt ist. Erstere bezeichnet man als **Sulfide**, letztere als **Sulfhydrate** oder **Hydrosulfide**.



Dargestellt wird Schwefelwasserstoff im allgemeinen aus Sulfiden (meist aus Schwefeleisen) durch Uebergießen mit Mineralsäuren.

Er ist unter gewöhnlichen Bedingungen ein Gas, das sich unter Atmosphärendruck bei —70° verflüssigt. Der verflüssigte Schwefelwasserstoff hat ein spezifisches Gewicht von etwa 0,9. Er siedet bei —73° und erstarrt bei —85° zu einer schneeartigen kristallinischen Masse, deren Schmelzpunkt bei — 83° liegt.

In der Kälte bildet Schwefelwasserstoff Hydrate, von denen eines von der Zusammensetzung $H_2S, 6H_2O$ wahrscheinlich isolierbar ist. Ein einfaches Hydrat von der Formel



ist nicht bekannt, doch kann man es als Grundlage der **Sulfoniumhydroxyde** und **Sulfoniumsalze** (s. S. 1149 und 1161) ansehen.

Sulfide kann man durch direktes Erhitzen der Metalle mit Schwefel (z. B. Schwefeleisen) oder durch Glühen der Sulfate mit Kohle, d. h. durch Reduktion der schwefelsauren Salze (z. B. Schwefelnatrium und Baryumsulfid) erhalten. Die in Wasser unlöslichen Sulfide erhält man auch beim Einleiten von Schwefelwasserstoff in die betreffenden Metallsalzlösungen oder durch doppelte Umsetzung letzterer mit löslichen Sulfiden. Letztere beiden Methoden sind bekanntlich von größter Wichtigkeit für die analytische Trennung der Metalle. Zahlreiche Sulfide kommen in der Natur vor. Sie bilden die sogenannten Kiese oder Blenden.

Den anorganischen Sulfiden und Sulfhydraten entsprechen organische normale und saure Ester, die man als **Alkylsulfide** (**Thioäther**) und als **Alkylsulfhydrate** (**Thioalkohole, Merkaptane**) bezeichnet (vgl. S. 1148, 1154 und 1155).

Wenn man in den Lösungen mancher Metallsulfide Schwefel auflöst, erhält man sogenannte **Polysulfide**. Dieselben sind als die Metallsalze eines schwefelreicheren Schwefelwasserstoffs des **Wasserstoffpersulfids** H_2S_5 aufzufassen. Zersetzt man sie mit verdünnter Salzsäure, so erhält man das Wasserstoffpersulfid als ein gelbes, durchsichtiges, eigenartig widrig riechendes Oel, das die Schleimhäute reizt und gleichzeitig süß und bitter schmeckt. Es hat ein spezifisches Gewicht von ca. 1,77 und ist bei vermindertem Druck destillierbar, zerfällt hierbei aber in Schwefelwasserstoff und verschiedene Wasserstoffpersulfide, von denen die Verbindungen H_2S_2 und H_2S_3 mit einiger Wahrscheinlichkeit als chemische Individuen anzusprechen sind. Die Konstitution der Polysulfide und des Wasserstoffpersulfids ist fraglich. So läßt sich vorläufig nicht entscheiden, ob man das Wasserstoffpersulfid H_2S_5 als Derivat einer Kette zweiwertiger Schwefelatome

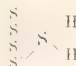


H—S.S.S.S.S—H

oder als eine „geschwefelte" Schwefelsäure



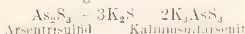
oder als Derivat eines zehnwertigen Schwefels

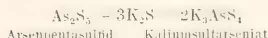


aufzufassen hat. Nach der Ansicht mancher Chemiker sollen sich die Polysulfide der Alkali- und Jodalkalimetalle von einer Kette zweiwertiger Schwefelatome, die übrigen Polysulfide aber von höherwertigem Schwefel ableiten.

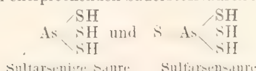
Den anorganischen Polysulfiden entsprechen wiederum organische Polysulfide, von denen aber nur die **Disulfide** näher bekannt sind. Diese haben sicher die Konstitution Alk—S—S—Alk, sind also als Ester des Wasserstoffpersulfids H—S—S—H aufzufassen (vgl. S. 1149 und 1156).

Die Sulfide der elektronegativen Metalle, sowie der Platingruppe und des Goldes lösen sich in Alkalisulfiden auf und bilden hierbei Alkalisalze sogenannter **anorganischer Sulfosäuren**:





Die diesen Salzen entsprechenden freien Sulfosäuren (z. B. die sulfarsenige Säure und die Sulfarsensäure), deren Konstitution man analog der der entsprechenden Sauerstoffsäuren annimmt



sind meist nicht beständig, sondern zerfallen sofort in Schwefelwasserstoff und Sulfid.

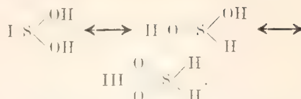
Die Bezeichnung der eben besprochenen Säuren als „Sulfosäuren" ist wenig glücklich. Besser wäre für sie der Name „**anorganische Thiosäuren**". Im allgemeinen versteht man unter Sulfosäuren nämlich Säuren, welche die Gruppe SO_3H enthalten (vgl. S. 1150, 1153 und 1163).

Eine Sauerstoff- oder Sauerstoff-Wasserstoffverbindung des zweiwertigen Schwefels ist nicht bekannt. Weder ein Hydrat noch ein Monoxyd des Schwefels scheinen als solche existenzfähig zu sein. Ein solches hypothetisches Hydrat des Schwefels könnte die asymmetrische, vom zweiwertigen Schwefel abgeleitete Konstitution I oder die damit tautomere (vgl. S. 1151) symmetrische Konstitution II mit vierwertigem Schwefel haben.



Von ersterer Form sind auch keine Derivate bekannt, während man als Alkylverbindungen der symmetrischen Form die **Sulfoxyde** (s. S. 1150 und 1161) ansehen kann.

Ein Hydrat des unbekannten Schwefelmonoxyds S=O könnte sich entweder in der symmetrischen Form I vom zweiwertigen oder in der asymmetrischen Form II vom vierwertigen oder in der wiederum symmetrischen tautomeren Form III vom sechswertigen Schwefel ableiten.



Man bezeichnet dies Hydrat als **Sulfoxylsäure**. Diese ist zwar auch nicht in freier Form bekannt, wird aber als Bestandteil der sogenannten **hydroschwefligen Säure** (s. S. 1153) angenommen. Außerdem leiten sich von ihr organische Derivate ab, so von der Form I vielleicht das sogenannte **Rongalit** (s. S. 1163). Als Monalkylderivate der Form III kann man die **Sulfinsäuren** (s. S. 1150 und 1162), als Dialkylderivate derselben Form die **Sulfone** (s. S. 1150 und 1161) ansehen. Derivate der Form II sind gewisse sogenannte **Sulfinsäureester** (s. S. 1150 und 1162).

Wenn Schwefel an der Luft verbrennt, wird er zu **Schwefeldioxyd** O=S=O oxydiert, das häufig aus Bequemlichkeit als schweflige Säure bezeichnet wird, in Wirklichkeit aber das Anhydrid dieser Säure ist.

Häufiger als durch Verbrennen von Schwefel wird Schwefeldioxyd durch Verbrennen (Abrösten) der natürlich vorkommenden Sulfide (s. S. 1151) dargestellt. Es dient zur Darstellung der Schwefelsäure und der für die Papierfabrikation wichtigen Sulfitlaugen sowie als Desinfektions- und Bleichmittel.

Schwefeldioxyd bildet unter gewöhnlichen Bedingungen ein farbloses Gas von dem bekannten erstickenden Geruch des brennenden Schwefels und von unangenehmem Geschmack. Es ist weder brennbar noch ist es imstande andere Verbrennungen zu unterhalten. Unter gewöhnlichem Druck verflüssigt sich Schwefeldioxyd bei etwa —10° und bildet dann eine wasserhelle, dünne Flüssigkeit vom Siedepunkt —8° und einem spezifischen Gewicht von 1,46 bei dieser Temperatur. Bei etwa —79° erstarrt es zu weißen Flocken vom Schmelzpunkt —73°.

Schwefeldioxyd ist beträchtlich löslich in Wasser und diese Lösung gibt alle Reaktionen einer Säure, so rötet sie blaues Lackmuspapier, was Schwefeldioxyd bei völligem Ausschluß von Feuchtigkeit nicht tut. Diese wässerige Lösung enthält die wahre **schweflige Säure** H_2SO_3, die sich aber in wasserfreiem Zustande nicht erhalten läßt, sondern sofort in SO_2 und Wasser zerfällt, doch existiert bei niedriger Temperatur ein in Würfeln kristallisierendes Hydrat $H_2SO_3 + 14 H_2O$, das bei $+2°$ schmilzt. Die schweflige Säure ist eine zweibasische Säure und bildet als solche normale Salze, die **Sulfite**, und saure Salze, die **Bisulfite**.

Für die Konstitution der schwefligen Säure kommen wiederum zwei tautomere Formeln in Betracht, nämlich die asymmetrische Formel I und die symmetrische Formel II



Welche Konstitution die freie schweflige Säure besitzt, ist nicht sicher entschieden, doch entsprechen ihre Salze sicher der asymmetrischen Formel I, da sie mit Halogenalkylen **Sulfosäuren** und **Sulfosäureester** (s. S. 1150 und 1163) liefern, welche beide sicher eine Alkylgruppe **direkt** an Schwefel gebunden enthalten.

Die anorganischen Sulfosäuren betrachtet man besser als Derivate der Schwefelsäure (s. S. 1154).

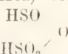
Dagegen hat das Thionylchlorid, das aus Schwefeldioxyd und Phosphorpentachlorid entsteht und eine stechend riechende Flüssigkeit vom Siedepunkt +79° und einem spezifischen Gewicht von 1,675 bildet, die symmetrische Konstitution $O=SCl_2$, da es mit Natriumalkoholat die von den Sulfosäureestern völlig verschiedenen „Ester der (symmetrischen) schwefligen Säure" (s. S. 1150 und 1164) liefert. Es ist demgemäß als Säurechlorid der symmetrischen schwefligen Säure aufzufassen.

Denkt man sich in der asymmetrischen schwefligen Säure das Hydroxylsauerstoffatom durch Schwefel ersetzt, so kommt man zu der in freiem Zustande nicht bekannten Thioschwefligen Säure, als deren Dialkylderivate die Alkyldisulfoxyde (s. S. 1150 und 1165) aufzufassen sind.

Wenn man wässerige schweflige Säure oder Natriumbisulfitlösung durch Eintragen von Zinkstaub reduziert, erhält man das Zink- oder Natriumsalz der sogenannten hydroschwefligen Säure. Das Natriumhydrosulfit ist als solches als Reduktionsmittel für die Küpenfärberei (vgl. den Artikel „Farbstoffe") und in Form einer organischen Verbindung (Hyraldit oder Hydrosulfit N.F s. S. 1163) als Aetzmittel für die Kattundruckerei wichtig.

Die freie hydroschweflige Säure, die aus ihrem Natriumsalz mit Schwefelsäure erhalten wird, ist eine sehr unbeständige gelbe Flüssigkeit, die sich unter Schwefelabscheidung zersetzt.

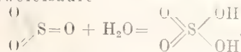
Für die freie hydroschweflige Säure und ihre Salze nahm man früher die Formel HSO_2 oder $NaSO_2$ an, doch ist es sehr viel wahrscheinlicher, daß beiden eine verdoppelte Formel zukommt. Am wahrscheinlichsten ist die Annahme, daß die hydroschweflige Säure ein gemischtes Anhydrid der schwefligen Säure und der hypothetischen Sulfoxylsäure (S. 1152) von der Konstitution



ist.

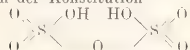
Oxydiert man Schwefeldioxyd weiter durch den Sauerstoff der Luft, was in der Technik in größtem Maßstabe entweder unter Benutzung von Katalysatoren, wie Platin, im sogenannten Kontaktprozeß, oder bei Gegenwart von Wasser mit Salpetersäure als Sauerstoffüberträger, im sogenannten Bleikammerprozeß ausgeführt wird, so entsteht Schwefeltrioxyd, das Anhydrid der Schwefelsäure oder in letzterem Falle wässerige Schwefelsäure. Schwefeltrioxyd $O=S\langle{}^{O}_{O}$, das auch noch durch Erhitzen von Sulfaten oder Pyrosulfaten erhalten werden kann, bildet farblose Prismen, die bei 15° schmelzen und bei 46,2° sieden. Bei Temperaturen unterhalb + 27° polymerisiert es sich zu dem sogenannten Schwefelhexoxyd S_2O_6, das die Konstitution $^{O}_{O}\rangle S\langle{}^{O}_{O}\rangle S\langle{}^{O}_{O}$ hat und auch als Anhydrid der Pyroschwefelsäure bezeichnet wird. Dasselbe bildet feine weiße Nadeln, die bei 50° noch nicht schmelzen, aber wieder in Schwefeltrioxyd übergehen.

Mit Wasser zusammengebracht löst sich SO_3 oder S_2O_6 unter Zischen und starker Erhitzung zu Schwefelsäure



Reine Schwefelsäure bildet eine dicke ölige Flüssigkeit, die bei 338° unter Zerfall in SO_3 und H_2O siedet. Sie erstarrt bei niedriger Temperatur zu einer kristallinischen Masse, die bei +10° wieder schmilzt. Ihr spezifisches Gewicht beträgt bei 15° 1,850. Die gewöhnliche konzentrierte Säure des Handels enthält 93 bis 94% H_2SO_4.

Löst man in H_2SO_4 überschüssiges SO_3, so erhält man sogenannte rauchende Schwefelsäure. Bei äquimolekularem Verhältnis $H_2SO_4+SO_3$ bildet sich die sogenannte Pyroschwefelsäure $H_2S_2O_7$ von der Konstitution

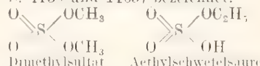


Dieselbe kristallisiert in Prismen vom Schmelzpunkt 35°.

Schwefelsäure ist eine starke zweibasische Säure und bildet als solche normale Salze (Sulfate) und saure Salze (Bisulfate).

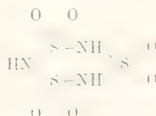
Sulfate kommen vielfach in der Natur vor und finden mannigfaltige Verwendung, doch läßt sich die freie Schwefelsäure ihres hohen Siedepunktes und ihrer Stärke wegen nicht in rationeller Weise aus ihnen gewinnen.

Entsprechend den beiden Reihen von Salzen lassen sich durch Ersatz der Wasserstoffatome der Schwefelsäure zwei Reihen von Estern gewinnen. Die normalen Ester werden auch als Dialkylsulfate, die sauren Ester als Alkylschwefelsäuren oder Aetherschwefelsäuren (s. S. 1150 und 1165) bezeichnet.



Das aus SO_2 und Chlor entstehende Sulfurylchlorid SO_2Cl_2, eine Flüssigkeit vom Siedepunkt 69° und dem spezifischen Gewicht 1,71 ist als normales Säurechlorid der Schwefelsäure, die aus SO_3 und Chlorwasserstoff entstehende Chlorsulfonsäure $Cl.SO_2.OH$, eine Flüssigkeit vom Siedepunkt 155° und dem spezifischen Gewicht 1,78, als Monochlorid der Schwefelsäure anzusehen.

Das normale Säureamid (vgl. den Artikel „Ammoniakderivate" Bd. I S. 276 und 279) der zweibasischen Schwefelsäure ist das aus Sulfurylchlorid und Ammoniak entstehende Sulfamid $SO_2(NH_2)_2$, das in Wasser sehr leicht lösliche Kristalle vom Schmelzpunkt 81° bildet. Daneben entsteht das Sulfimid $SO_2:NH$, das sich aber sofort zu dem trimolekularen Trisulfimid



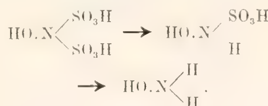
polymerisiert.

Das Monamid der Schwefelsäure ist die aus Schwefeltrioxyd und Ammoniak oder aus Hydroxylamin und Schwefeldioxyd entstehende Amidosulfosäure $NH_2.SO_2.OH$, die farblose, in Wasser wenig lösliche rhombische Prismen bildet.

Aus Ammoniak und Chlorsulfonsäure entsteht hauptsächlich das Ammoniumsalz der Imidosulfosäure $HN(SO_2.OH)_2$, die in freiem Zustande unbeständig ist und als das sekundäre Monamid der Schwefelsäure angesehen werden kann. Schließlich kennt man auch die sogenannte Nitrilsulfosäure $N(SO_2.OH)_3$, das tertiäre Monamid der Schwefelsäure. Dieselbe entsteht als Endprodukt der Einwirkung von Schwefeldioxyd auf salpetrige Säure.

Faßt man die letztgenannte Reaktion, die bei Gegenwart von Wasser vor sich geht, als Wasserabspaltung zwischen dem Orthohydrat der salpetrigen Säure $N(OH)_3$ und der asymmetrischen schwefligen Säure $H.SO_2.OH$ (vgl. S. 1152) auf, so kann man folgende drei Stufen unterscheiden. Mit einem Molekül schwefliger Säure entsteht zunächst Dihydroxylaminsulfosäure $(HO)_2N.SO_2.OH$, die nur in Form von Salzen bekannt ist und in Freiheit sofort unter Entwickelung von Stickoxydul zerfällt. Geht die Reaktion mit einem zweiten Molekül schwefliger Säure weiter, so entsteht Hydroxylamindisulfosäure $(HO)N(SO_2.OH)_2$ und schließlich mit einem dritten Molekül schwefliger Säure die vorher erwähnte Nitrilsulfosäure $N(SO_2.OH)_3$.

Die Hydroxylamindisulfosäure ist dadurch von Interesse, daß sie mit verdünnten Mineralsäuren unter Wasseraufnahme und Abspaltung von Schwefelsäure zuerst Hydroxylaminmonosulfosäure und dann Hydroxylamin (vgl. den Artikel „Ammoniakderivate" Bd. I S. 269) liefert

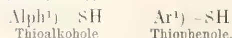


Denkt man sich in der Schwefelsäure eines der beiden Hydroxylsauerstoffatome durch Schwefel ersetzt, so kommt man zur Thioschwefelsäure $\begin{matrix}O\\O\end{matrix}\!>\!S\!<\!\begin{matrix}SH\\OH\end{matrix}$, die früher fälschlich als unterschweflige Säure bezeichnet wurde. Praktisch gewinnt man deren normale Salze, die Thiosulfate (früher fälschlich Hyposulfite genannt) durch Kochen von Sulfiten mit Schwefel oder durch langsame Oxydation der Sulfide, insbesondere der Rückstände von der Leblancschen Sodafabrikation (Calciumsulfid). Das Natriumthiosulfat $Na_2S_2O_3$ wird wegen seiner momentanen Umsetzung mit Chlor unter dem Namen Antichlor in der Bleicherei und wegen seiner Fähigkeit Halogensilber zu lösen unter dem Namen Fixiersalz in der Photographie vielfach benutzt. Die freie Thioschwefelsäure ist nur in verdünnter wässeriger Lösung darstellbar und auch hier nur wenige Minuten haltbar. Sie zerfällt in Schwefel, Schwefeldioxyd und Wasser. Auch saure Salze der Thioschwefelsäure sind nicht darstellbar.

Ersetzt man in der Thioschwefelsäure das am Schwefel stehende Wasserstoffatom durch eine Alkylgruppe, so kommt man zu den in freiem Zustande ebenfalls nicht beständigen Alkylthioschwefelsäuren (s. S. 1150 und 1166). Andere organische Derivate der Thioschwefelsäure sind nicht bekannt.

Die der Thioschwefelsäure nahestehenden Säuren Dithionsäure, Trithionsäure, Tetrathionsäure und Pentathionsäure, von denen man keine direkten organischen Derivate kennt (vgl. jedoch S. 1165), seien hier nur erwähnt, ebenso die von höheren Schwefeloxyden abgeleiteten Ueberschwefelsäure HSO_4 und Sulfomonopersäure H_2SO_5.

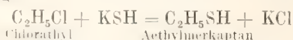
3. Organische Thioverbindungen. 3a) Alkylsulfhydrate (Merkaptane oder Thioalkohole bezw. Thiophenole). Wie schon erwähnt (s. S. 1148), kann man die aus dem Schwefelwasserstoff H_2S durch Eintritt einer Alkylgruppe für ein Wasserstoffatom abgeleiteten Alkylsulfhydrate Alk – S – H auch als Alkohole bezw. Phenole ansehen, in denen das Sauerstoffatom durch Schwefel ersetzt worden ist, und bezeichnet sie dementsprechend auch als Thioalkohole bezw. Thiophenole, je nachdem die SH-Gruppe an einen aliphatischen oder direkt an einen aromatischen Rest gebunden ist:



Alph[1]) – SH Thioalkohole Ar[1]) – SH Thiophenole.

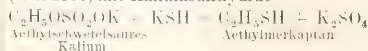
Für beide gemeinschaftlich ist die Bezeichnung Merkaptane sehr gebräuchlich.

Bildungsweisen der Merkaptane. Die Thioalkohole kann man am bequemsten durch Behandeln von Halogenalkylen mit Kaliumsulfhydrat in alkoholischer Lösung



$C_2H_5Cl + KSH = C_2H_5SH + KCl$ (Chloräthyl; Aethylmerkaptan)

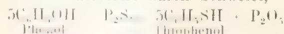
oder durch Destillation der ätherschwefelsauren Salze (s. S. 1165) oder der Alkylsulfate (s. S. 1166) mit Kaliumsulfhydrat



$C_2H_5OSO_2OK + KSH = C_2H_5SH + K_2SO_4$ (Aethylschwefelsaures Kalium; Aethylmerkaptan)

darstellen. Diese Austauschreaktion versagt natürlich im allgemeinen für die Darstellung der Thiophenole.

Für beide Gruppen gemeinsam ist die Verwandlung der Alkohole oder Phenole in Merkaptane mittels Phosphorsulfid, d. h. der direkte Ersatz des Sauerstoffs durch Schwefel,



$5C_6H_5OH + P_2S_5 = 5C_6H_5SH + P_2O_5$ (Phenol; Thiophenol)

doch verläuft diese Reaktion nicht sehr glatt und ist praktisch wenig brauchbar.

Die beste Darstellungsmethode für Thiophenole ist die Reduktion der Sulfochloride (s. S. 1164) oder der aus ihnen durch

[1]) Vgl die Fußnoten auf S. 1148.

Reduktion zunächst entstehenden Sulfinsäuren (s. S. 1162)

$$\underset{\text{Benzolsulfochlorid}}{C_6H_5.SO_2Cl} \longrightarrow \underset{\text{Benzolsulfinsäure}}{C_6H_5.SO_2H} \longrightarrow \underset{\text{Thiophenol}}{C_6H_5SH}$$

Für aliphatische Merkaptane hat diese Reaktion nur theoretisches Interesse (s. S. 1162).

Außerdem kann man Thioalkohole noch durch Ueberleiten eines Gemisches von Schwefelwasserstoff und Alkoholdämpfen über erhitzte Thorerde und Thiophenole aus Diazoniumsalzen (vgl. den Artikel „Azoverbindungen" Bd. I S. 755) darstellen.

Eigenschaften der Merkaptane. Die Merkaptane sind meist ziemlich flüchtige farblose Flüssigkeiten. Ihr Siedepunkt liegt erheblich tiefer als der der entsprechenden Sauerstoffverbindungen. Nur die hochmolekularen Merkaptane sind fest. In Wasser sind sie kaum löslich und besitzen, namentlich in den niederen Reihen, einen äußerst widerlichen, durchdringenden Geruch.

Von Aethylmerkaptan kann man noch eine Menge von 0,000 000 000 0022 g (den 460-millionsten Teil eines Milligramms) am Geruch wahrnehmen, eine Menge, die etwa 250mal kleiner ist als die kleinste spektralanalytisch erkennbare Natriummenge.

Die Merkaptane verhalten sich in mancher Beziehung den Alkoholen ähnlich. Sie sind wie diese schwach saure Verbindungen, deren Sulfhydrylwasserstoffatom durch Alkalimetalle ersetzbar ist, doch ist die Säurenatur bei den Merkaptanen erheblich stärker ausgeprägt als bei den Alkoholen, so daß sie im Gegensatz zu letzteren auch mit Schwermetallen beständige Salze zu bilden vermögen und, im Gegensatz zu den in Wasser unlöslichen Alkoholen, in wässerigem Alkali löslich sind. Von den Metallsalzen, die man als Merkaptide bezeichnet, sind die aus den Merkaptanen mit Quecksilberoxyd entstehenden Quecksilbersalze am längsten bekannt. Sie haben die Bildung des Namens „Merkaptan" (corpus mercurio aptum oder mercurium captans) veranlaßt.

Aehnlich wie sich zwei Moleküle eines Alkohols mit einem Molekül eines Aldehyds zu den sogenannten Acetalen (Aethern der hypothetischen Orthoaldehyde) kondensieren, tun dies die Merkaptane mit Aldehyden und Ketonen zu den sogenannten Merkaptalen und Merkaptolen (s. S. 1156), Aethern zweiwertiger Merkaptane, welche zwei Sulfhydrylgruppen von demselben Kohlenstoffatom enthalten und infolgedessen ebensowenig beständig sind, wie die entsprechenden Sauerstoffverbindungen, die Orthoaldehyde.

An Aethylendoppelbindungen addieren sich Merkaptane unter Bildung von Sulfiden (s. S. 1156).

Eine besonders charakteristische und wichtige Verschiedenheit von den Alkoholen zeigen die Merkaptane in ihrem Verhalten gegen Oxydationsmittel. Während die Hydroxylgruppe selbst einer Oxydation nicht zugänglich ist, während also bei den Alkoholen der mit der Hydroxylgruppe verbundene Alkylrest oxydiert wird (Bildung von Aldehyden, Ketonen und Karbonsäuren), bedingt die Fähigkeit des Schwefelatoms Ketten zu bilden oder in höhere Valenzstufen überzugehen (vgl. S. 1148) die Möglichkeit einer Oxydationswirkung auf die Sulfhydrylgruppe selbst. So liefern die Merkaptane, und zwar sowohl Thioalkohole als auch Thiophenole bei gelinder Oxydation Disulfide (S. 1156) und weiter Disulfoxyde (S. 1165)

$$\underset{\text{Aethylmerkaptan}}{2C_2H_5.SH} \longrightarrow \underset{\text{Aethyldisulfid}}{\begin{matrix} C_2H_5-S \\ C_2H_5-S \end{matrix}} \longrightarrow \underset{\text{Aethyldisulfoxyd.}}{\begin{matrix} C_2H_5\ \ SO_2 \\ C_2H_5\ \ S \end{matrix}}$$

Mit starken Oxydationsmitteln liefern die Merkaptane Sulfosäuren (S. 1163)

$$\underset{\text{Thiophenol}}{C_6H_5SH} \longrightarrow \underset{\text{Benzolsulfosäure}}{C_6H_5.SO_3H}$$

Auch konzentrierte Schwefelsäure wirkt auf Merkaptane als Oxydationsmittel ein, indem sie selbst in schweflige Säure übergeht. Sie liefert also keine esterartigen, den Aetherschwefelsäuren (S. 1165) analogen Produkte, sondern Disulfide.

3b) Alkylsulfide oder Thioäther. Die Alkylsulfide verhalten sich zu den Merkaptanen wie die Aether zu den Alkoholen; sie sind also entweder als „geschwefelte" (s. S. 1148) Aether oder als Dialkylderivate des Schwefelwasserstoffs aufzufassen.

Bildungsweisen der Thioäther. Aliphatische Thioäther entstehen am bequemsten aus Halogenalkylen oder ätherschwefelsauren Salzen mit neutralem Schwefelkalium

$$2C_2H_5OSO_3K + K_2S = (C_2H_5)_2S + 2K_2SO_4.$$

Auch aus Natriummerkaptiden und Halogenalkylen entstehen Thioäther. Auf diese Weise kann man „gemischte Sulfide", d. h. Thioäther mit zwei verschiedenen Alkylgruppen, und auch fettaromatische Thioäther darstellen, wenn man auf die Natriumverbindung eines Thiophenols eine aliphatische Halogenverbindung einwirken läßt.

$$C_6H_5SNa + Cl.C_2H_5 = \underset{\text{Phenyläthylsulfid.}}{C_6H_5.S.C_2H_5} + NaCl$$

Rein aromatische Sulfide lassen sich nach diesen Methoden natürlich meist nicht darstellen. Diese erhält man entweder durch Reduktion der betreffenden Sulfone (s. S. 1162)

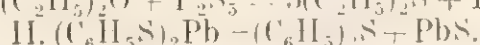
$$\underset{\text{Sulfobenzid}}{(C_6H_5)_2SO_2} \longrightarrow \underset{\text{Phenylsulfid.}}{(C_6H_5)_2S}$$

oder bei der Einwirkung von Diazoniumchloriden auf die Natriumsalze von Thiophenolen (vgl. den Artikel „Azoverbindungen" Bd. I S. 755).

$$C_6H_5.N_2.Cl + NaSC_6H_5 = C_6H_5.S.C_6H_5 + N_2 + NaCl.$$

Aromatische sowie aliphatische Thioäther entstehen noch bei der Behandlung der gewöhnlichen Aether mit Phosphorpentasulfid (I) und bei der Destillation der Quecksilber- oder Bleimerkarptide (II)

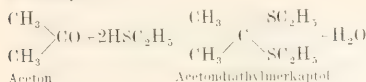




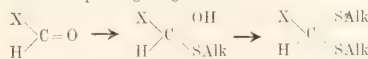
Sulfide erhält man auch durch Anlagerung von Merkaptanen an ungesättigte Verbindungen.

Technisch wichtig ist eine Klasse von Sulfiden, welche die charakteristische Gruppierung der Thioäther zweimal im gleichen Molekül enthalten.

Man gewinnt solche Verbindungen, die man als geschwefelte Acetale (s. S. 1155) auffassen kann, durch Kondensation von Merkaptanen mit Aldehyden oder Ketonen bei Gegenwart von Salzsäure und bezeichnet die aus Aldehyden gewonnenen als Merkaptale, die aus Ketonen gewonnenen als Merkaptole



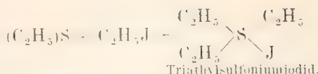
Diese Reaktion zerfällt in zwei Phasen. Zunächst addiert sich ein Molekül Merkaptan an die C=O-Gruppe des Aldehyds oder Ketons. Es entstehen Oxysulfide, die man als einfach geschwefelte Monoalkyläther der sogenannten Orthoaldehyde $X.CH(OH)_2$ und Orthoketone $(X)(Y)C(OH)_2$ auffassen kann, und die dann mit einem zweiten Molekül Merkaptan unter Wasserabspaltung reagieren.



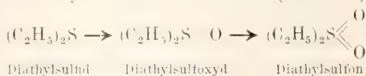
Ebenso wie einfache Aldehyde und Ketone reagieren im allgemeinen kompliziertere Verbindungen, welche eine Aldehyd- oder Ketongruppe enthalten.

Die Wichtigkeit der Merkaptole beruht darauf, daß einige von ihnen bei der Oxydation (s. unten) wirksame Schlafmittel liefern.

Eigenschaften der Thioäther. Die Alkylsulfide sind farblose, in Wasser nicht lösliche Flüssigkeiten oder auch kristallinische Verbindungen, die in ganz reinem Zustande ätherisch, in rohem Zustande aber sehr widerlich riechen. Die Thioäther sind als normale Aether des Schwefelwasserstoffs natürlich indifferent, d. h. sie bilden keine Metallsalze, wohl aber liefern sie mit verschiedenen Halogenmetallen gut kristallisierende Doppelsalze, z. B. $(C_2H_5)_2S.\ HgCl_2$. Ebenso bilden sie in der Kälte mit Brom und Jod kristallinische Additionsprodukte, z. B. $(C_2H_5)_2S(Br)_2$. Dieselbe Additionsfähigkeit zeigen die Thioäther auch Halogenalkylen gegenüber, mit denen sie sich zu den sogenannten Sulfoniumhalogeniden (s. S. 1149 u. 1160) verbinden.

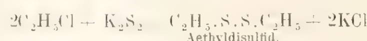


Ueberhaupt zeigt das Schwefelatom der Thioäther große Neigung in eine höhere Valenzstufe überzugehen. So sind sie im Gegensatz zu den gewöhnlichen Aethern leicht oxydierbar und liefern hierbei erst Sulfoxyde und dann Sulfone (s. S. 1161)

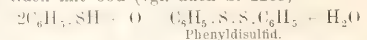


In ganz analoger Reaktion liefern die Merkaptale und Merkaptole (s. oben), welche zwei solche Schwefelatome enthalten, bei der Oxydation Disulfone (s. S. 1162), von denen einige wirksame Schlafmittel darstellen.

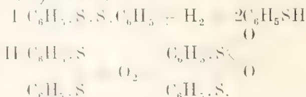
3c) Disulfide und Polysulfide. Die Alkyldisulfide kann man als Alkyläther des Wasserstoffpersulfids H.S.S.H (s. S. 1149 und 1152) ansehen. Die aliphatischen Disulfide entstehen dementsprechend aus Kaliumdisulfid mit Halogenalkylen oder ätherschwefelsauren Salzen



Besonders leicht bilden sich alle Arten von Disulfiden bei der Einwirkung gelinder Oxydationsmittel auf Merkaptane (vgl. S. 1155), so beim Stehen ammoniakalischer Merkaptanlösungen an der Luft, bei der Einwirkung konzentrierter Schwefelsäure oder von Brom auf Merkaptane oder aus Natriummerkaptiden mit Jod (vgl. auch S. 1163)

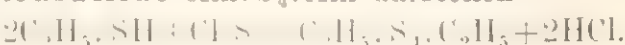


Die Disulfide sind flüssige oder feste farblose Körper von unangenehmem Geruch. Durch Reduktionsmittel gehen sie wieder in Merkaptane über (I), während sie bei der Oxydation (II) die sogenannten Disulfoxyde oder Thiosulfonsäureester (s. S. 1165) liefern.



Mit Halogenalkylen liefern die Disulfide unter Sprengung der Schwefelkette Trialkylsulfoniumsalze.

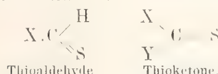
Polysulfide sind bisher nur in sehr geringer Anzahl bekannt und wenig erforscht. Aus Chlorschwefel (S_2Cl_2) und Merkaptanen entstehen gelbe übelriechende Oele, die wahrscheinlich Tetrasulfide Alk.S_4.Alk darstellen



Das so gewonnene Dimethyltetrasulfid geht

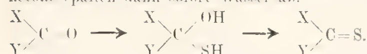
beim Erhitzen im Vakuum in Dimethyltrisulfid $CH_3.S_3.CH_3$ über.

3d) Thioaldehyde und Thioketone. Die Thioaldehyde und Thioketone kann man von den gewöhnlichen Aldehyden und Ketonen durch Ersatz des Sauerstoffs durch Schwefel ableiten. Sie sind also Sulfanhydride der an sich nicht beständigen zweiwertigen Merkaptane, deren beide Sulfhydrylgruppen am selben Kohlenstoffatom haften (vgl. S. 1155). Natürlich kann man sie auch als Derivate des Schwefelwasserstoffs auffassen, dessen beide Wasserstoffatome durch eine zweiwertige Alkylidengruppe substituiert worden sind



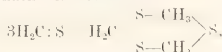
Die einfachen Thioaldehyde und Thioketone sind nur wenig bekannt, da sie außerordentlich zur Polemerisation neigen (s. unten). Sie entstehen aus gewöhnlichen Aldehyden und Ketonen und Schwefelwasserstoff bei Gegenwart von Salzsäure.

Zuerst addiert sich, wie bei der Merkaptal- und Merkaptolbildung (s. S. 1156) ein Molekül Schwefelwasserstoff an die Aldehyd- oder Ketongruppe und die so entstehenden Oxysulfhydrate oder einfach geschwefelten Orthoaldehyde bezw. Orthoketone spalten dann sofort Wasser ab.

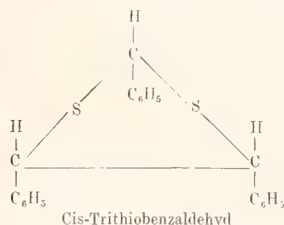


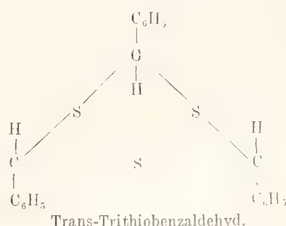
Die einfachen Thioaldehyde und Thioketone sind in den niedrigen Reihen sehr leicht flüchtige, außerordentlich stark und sehr unangenehm riechende Flüssigkeiten. Die Intensität des Geruches ist namentlich bei dem einfachsten Thioaceton so enorm, daß sie das Arbeiten mit dieser Substanz in der Nähe bewohnter Gegenden zur Unmöglichkeit macht. In reinem Zustande sind bisher nur einige wenige aromatische Thioketone, Thioacetophenon $CH_3 . CS . C_6H_5$ und Thiobenzophenon $C_6H_5.CS.C_6H_5$ isoliert worden. Bemerkenswert ist die blaue Farbe dieser Verbindungen, welche zeigt, daß die Thiokarbonylgruppe C=S zu den chromophoren Gruppen gehört (vgl. den Artikel „Farbstoffe"). Im allgemeinen polymerisieren sich, wie schon erwähnt, die Thioaldehyde und Thioketone sofort zu trimolekularen Komplexen.

Die so entstehenden Trithioaldehyde und Trithioketone besitzen, wie ihre Oxydation zu Trisulfonen (s. S. 1162) zeigt, einen Sechsring von je drei miteinander abwechselnden Kohlenstoff- und Schwefelatomen, sind also ringförmige Thioäther und gehören eigentlich zu den heterozyklischen Verbindungen. Die Polymerisation des einfachsten Thioformaldehyds verläuft nach dem Schema



und alle höheren Trithioaldehyde und Trithioketone kann man als Alkylderivate dieses Trithioformaldehyds auffassen. Die Trithioaldehyde und Trithioketone sind feste, farblose und geruchlose Verbindungen. Die Trithioaldehyde sind dadurch interessant, daß sie mit Ausnahme des Trithioformaldehyds in zwei stereoisomeren Formen existieren, die sich dadurch voneinander unterscheiden, daß die an dem Sechsring haftenden Alkylgruppen zu der aus den 6 Ringgliedern gebildeten Ebene räumlich entweder nach der gleichen oder nach verschiedenen Richtungen hin angeordnet sind. Man unterscheidet danach wie in analogen Fällen Cis- und Trans-Isomere (vgl. den Artikel „Isomerie").


Cis-Trithiobenzaldehyd

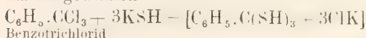

Trans-Trithiobenzaldehyd.

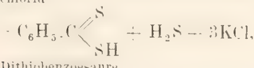
Die Trithioaldehyde und Trithioketone verhalten sich bei der Oxydation den gewöhnlichen Thioäthern analog und liefern, wie schon erwähnt, ringförmige Trisulfone (s. S. 1162).

3e) Thiosäuren und deren Derivate. Wie schon angedeutet (s. S. 1148) leiten sich von den Karbonsäuren $X.C\genfrac{}{}{0pt}{}{O}{OH}$ drei Reihen von geschwefelten Derivaten ab: die Dithiosäuren, in denen beide Sauerstoffatome der Karboxylgruppe, die Thiolsäuren, in denen das Hydroxylsauerstoffatom, und die Thionsäuren, in denen das Karbonylsauerstoffatom durch Schwefel ersetzt ist.

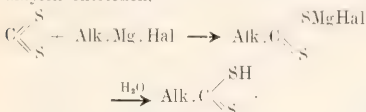
Die Dithiosäuren, deren Dithiokarboxylgruppe direkt an einem aromatischen Kern steht, lassen sich aus den entsprechen-

den Trichloriden mit alkoholischem Schwefelkalium gewinnen

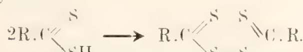




während die aliphatischen Dithiosäuren aus Schwefelkohlenstoff und Magnesiumhalogenalkylen entstehen.



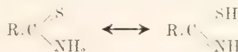
Die **Dithiobenzoesäure** ist ein zersetzliches violettrotes Oel, während die niederen aliphatischen Dithiosäuren rotgelbe, unzersetzt destillierbare Oele von widerlichem Geruch und stark saurem Charakter darstellen, die sich an der Luft leicht zu beständigen festen **Dithioacyldisulfiden** oxydieren



Von den **Monothiosäuren** kennt man in freiem Zustand immer nur eine Form, von der man nicht entscheiden kann, ob es die **Thiolsäure** oder die **Thionsäure** ist. Offenbar gehören diese Säuren zu den **tautomeren Verbindungen**



Die Salze der Thiosäuren entsprechen der Thiolform und auch die bekannten Ester sind, wenigstens in der aliphatischen Reihe, Ester der Thiolform (S—Alkylester). Bei den **Thiamiden** muß man wiederum Tautomerie annehmen (vgl. den Artikel „**Ammoniakderivate**" S. 278), d. h. sie können im Sinne der beiden Formeln

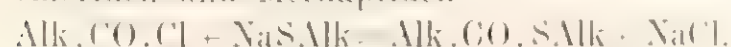


als **wahre Thiamide** oder als **Imidothiolsäuren** reagieren.

Man gewinnt die Thiosäuren entweder aus den Sauerstoffsäuren durch Erhitzen mit Phosphorpentasulfid oder aus Säurechloriden und Kaliumsulfhydrat

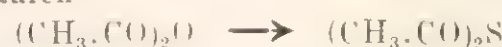


Analog entstehen die Ester aus Säurechloriden und Merkaptiden

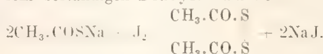


Die **Thiamide** entstehen aus den gewöhnlichen Amiden mit Schwefelphosphor oder durch Addition von Schwefelwasserstoff an die Säurenitrile (vgl. den Artikel „**Ammoniakderivate**" S. 277 und 285). Analog entstehen durch Addition von Markaptanen an Nitrile (daselbst S. 283) die **Imidothioäther**, Aether der vorher erwähnten **Imidothiolsäuren**.

Aus Säureanhydriden erhält man mit Schwefelphosphor **Diacylsulfide**, die Sulfanhydride der Thiolsäuren



und aus den Salzen der Thiolsäuren mit Jod oder aus den Thiosäuren selbst durch Elektrolyse die sehr beständigen **Diacyldisulfide**

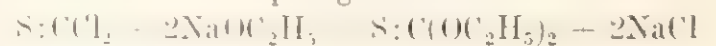


Die **Monothiosäuren** sind flüssige oder niedrigschmelzende feste Körper von unangenehmem Geruch. Die Thiolester sind lauchartig riechende Flüssigkeiten, die Thioamide farblose, gut kristallisierende Körper.

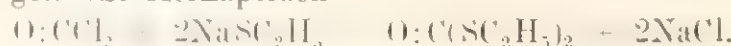
Von besonderem Interesse sind die **Thioderivate der Kohlensäure**, die in dem Artikel „**Kohlensäurederivate**" näher zu besprechen sind. Wie schon erwähnt (S. 1149), sind fünf geschwefelte Derivate der hypothetischen Kohlensäure möglich. Die freien Säuren sind nicht bekannt oder äußerst unbeständig, wohl aber kennt man zahlreiche Salze, Ester, Amide usw. derselben.

Als das Sulfanhydrid der Trithiokohlensäure oder das Anhydrid der Dithiokarbonsäure hat man den durch direkte Vereinigung von Schwefel und Kohlenstoff bei Rotglut entstehenden **Schwefelkohlenstoff** S=C=S aufzufassen, während man das **Kohlenoxysulfid** O=C=S, das aus Kohlenoxyd und Schwefel bei Rotglut entsteht, als das Anhydrid der Karbonylmonothiosäure oder der Monothiokarbonsäure oder als das Sulfanhydrid der Karbonyldithiosäure oder der Dithiokarbonsäure ansehen kann. Dementsprechend ist das **Thiophosgen** oder **Thiokarbonylchlorid** $S:CCl_2$ das Säurechlorid der geschwefelten Kohlensäure und entsteht aus Schwefelkohlenstoff mit Phosphorpentachlorid oder mit Chlor.

Die **Ester der Monothiokarbonsäure** entstehen aus Thiophosgen mit Natriumalkoholat



diejenigen der **Karbonyldithiosäure** aus Phosgen mit Merkaptiden

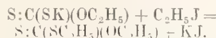


Die **O-Monoalkylester der Dithiokarbonsäure** $S:C\begin{smallmatrix}OAlk\\SH\end{smallmatrix}$, die natürlich noch saure Eigenschaften zeigen, bezeichnet man als **Xanthogensäuren**. Sie führen diesen Namen nach der gelben Farbe ihrer Kupferoxydsalze (ξανθός gelb). Die Alkalisalze der Xanthogensäuren entstehen aus Schwefelkohlenstoff, Alkalihydroxyd und dem betreffenden Alkohol. So erhält man aus äthylalkoholischer Kalilauge das Kaliumsalz der **Aethylxanthogensäure**

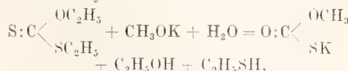


Die freien Xanthogensäuren zersetzen sich leicht wieder in Schwefelkohlenstoff und Alkohol.

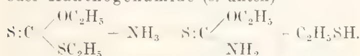
Aus den Salzen erhält man mit Alkyljodiden die Ester der Xanthogensäuren (Dialkylester der Dithiokarbonsäure) knoblauchartig riechende, unzersetzt destillierbare Flüssigkeiten



Diese Ester spalten bei der Einwirkung von Alkoholaten Merkaptan und Alkohol ab und liefern Salze der Karbonylmonothiosäure-O-Monoalkylester



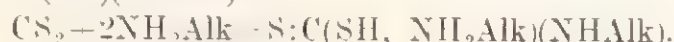
aus denen man mit Alkyljodid die Dialkylester der Karbonylmonothiosäure erhalten kann. Mit Ammoniak liefern die Xanthogensäureester unter Abspaltung von Merkaptan Ester der Thionkarbaminsäure, die sogenannten Thiourethane oder Xanthogenamide (s. unten)



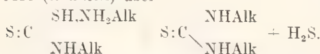
Die Salze der Trithiokohlensäure entstehen aus Schwefelkohlenstoff und Alkalisulfid. Sie lassen sich in üblicher Weise in die entsprechenden Ester überführen. Die freie Trithiokohlensäure ist ein unbeständiges rotbraunes Oel.

Von den geschwefelten Kohlensäuren leiten sich, wie von der gewöhnlichen Kohlensäure (vgl. den Artikel „Kohlensäurederivate"), Amide, Imide usw. ab. Den beiden Monothiokohlensäuren entsprechen als Monamide die Karbaminthiolsäure $O{=}C(SH)(NH_2)$, deren Ammoniumsalz aus Kohlenoxysulfid (S. 1158) mit alkoholischem Ammoniak entsteht, und die Thionkarbaminsäure (Xanthogenaminsäure, Sulfkarbaminsäure) $S{:}C(OH)(NH_2)$, die nur in Form von Alkylderivaten bekannt ist. Die Alkylester $S{:}C(OAlk)(NH_2)$, die aus Xanthogensäureestern mit Ammoniak entstehen (s. oben), werden auch als Thiourethane oder Xanthogenamide bezeichnet.

Bei der Einwirkung von alkoholischem Ammoniak (oder von primären und sekundären Aminen) auf Schwefelkohlenstoff entstehen die entsprechenden Salze der Dithiokarbaminsäure $S{:}C(SH)(NH_2)$ und ihrer N-Alkylderivate $S{:}C(SH)(NHAlk)$

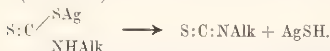


Beim Erhitzen gehen die Aminsalze der Alkyldithiokarbaminsäure in Dialkylthioharnstoffe (s. unten) über



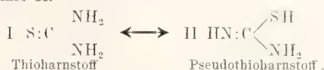
Das Ammoniumsalz liefert bei weiterer Einwirkung von Ammoniak Rhodanammonium (s. S. 1160).

Die Metallsalze der Monoalkyldithiokarbaminsäure liefern beim Kochen mit Wasser Senföle (s. S. 1160)

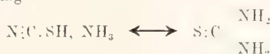


Aus den Salzen der Dithiokarbaminsäure lassen sich mit Jodalkylen die Ester derselben Säure, die Dithiourethane $S{:}C(SAlk)(NH_2)$ darstellen.

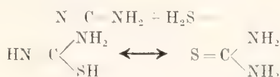
Das geschwefelte Analogon des Harnstoffes, d. h. das normale Diamid der Thionkohlensäuren ist der Thioharnstoff (Sulfoharnstoff, Thiokarbamid). Man erteilt ihm dementsprechend gewöhnlich die Formel I, der auch das Verhalten dieser Verbindung im allgemeinen entspricht. Doch gehört der Thioharnstoff zu den tautomeren Verbindungen und reagiert zuweilen als Iminokarbaminthiolsäure, d. h. als Imid der Karbaminthiolsäure (s. oben.) nach der Formel II.



Der Thioharnstoff entsteht beim Erhitzen von Rhodanammonium (dem Ammoniumsalz der Thiocyansäure, vgl. S. 1160) durch teilweise Umlagerung

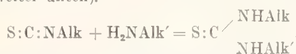


oder aus Cyanamid durch Anlagerung von Schwefelwasserstoff



Der Thioharnstoff bildet sowohl mit Säuren als auch mit Basen Salze. Beim Erhitzen lagert er sich teilweise wieder in Rhodanammonium um. Es geht mit Kaliumpermanganat in gewöhnlichen Harnstoff, mit Silber-, Quecksilber- oder Bleioxyd in Cyanamid über. Mit chlorsubstituierten Aldehyden, Ketonen und Säuren liefert der Thioharnstoff heterozyklische Verbindungen der Thiazolreihe. Hierbei, wie bei der Einwirkung von Halogenalkylen, bei der nicht N-Alkylderivate, sondern S-Alkylderivate entstehen, reagiert der Thioharnstoff in seiner Pseudoform (s. oben).

Alkylthioharnstoffe, deren Alkylgruppen an Stickstoff gebunden sind, entstehen durch Erhitzen des entsprechenden Aminrhodanats (vgl. oben), beim Erhitzen der Aminsalze der Alkyldithiokarbaminsäuren (vgl. oben) und durch Addition von Ammoniak, primären oder sekundären Aminen an die sogenannten Senföle (s. weiter unten).



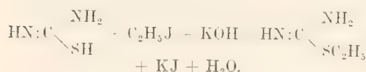
Symmetrische Diarylthioharnstoffe (s. S. 1148 Fußnote) entstehen am bequemsten beim Kochen von Schwefelkohlenstoff mit aromatischen primären Aminen, so der Diphenylthioharnstoff (Thiokarbanilid) mit Anilin.



Beim Erhitzen mit Salzsäure werden die Alkylthioharnstoffe wieder in Senföle und Ammoniak oder Amin gespalten. Mit Quecksilberoxyd oder Bleioxyd geben sie Alkylharnstoffe.

Bei der Einwirkung von Alkylhalogeniden auf Thioharnstoff entstehen, wie schon erwähnt nicht Alkylthioharnstoffe, sondern Alkyl-

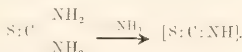
pseudothioharnstoffe (Alkyl-ψ-thioharnstoffe), in denen das Alkyl an Schwefel gebunden ist.



Die Konstitution dieser Verbindungen geht daraus hervor, daß sie mit Ammoniak Guanidin und Merkaptane liefern.

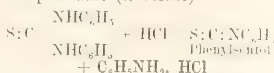
Dem gewöhnlichen Semikarbazid (vgl. den Artikel „Ammoniakderivate" Bd. I S. 308) entspricht das Thiosemikarbazid $S:C(NH_2)(NH.NH_2)$, das zur Isolierung von Aldehyden und Ketonen besonders geeignet ist, weil die entsprechenden Thiosemikarbazone mit Silber-, Kupfer- und Quecksilbersalzen schwerlösliche Niederschläge bilden.

Denkt man sich aus dem Thioharnstoff, dem normalen Amid der Thionkohlensäure, Ammoniak abgespaltet, so erhält man das Imid der Thionkohlensäure, das in Analogie zu der entsprechenden Sauerstoffverbindung als Isothiocyansäure oder Isosulfocyansäure bezeichnet wird.



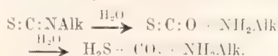
Diese Säure ist weder in freier Form noch in Form von Salzen bekannt, wohl aber kennt man ihre Ester, die man nach dem im Senfsamen vorkommenden Allylester, dem gewöhnlichen Senföl, allgemein als Senföle bezeichnet.

Diese Senföle entstehen aus den alkylierten Thioharnstoffen durch Destillation mit Salzsäure oder Phosphorsäure (s. vorher)



oder aus den Salzen der Monoalkyldithiokarbaminsäure durch Kochen mit Wasser (s. S. 1159) und somit aus Schwefelkohlenstoff und primären Aminen (A. W. v. Hofmanns „Senfölprobe" zum Nachweis primärer Amine). Die Senföle entstehen auch aus den isomeren Rhodanalkylen (s. weiter unten) durch Umlagerung beim Erhitzen und aus Isocyansäureestern mit Phosphorpentasulfid.

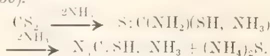
Die Senföle sind stechend riechende, in Wasser kaum lösliche Flüssigkeiten, die zu Tränen reizen und auf der Haut Blasen ziehen. Sie zerfallen beim Erhitzen mit verdünnten Säuren in primäre Amine und Kohlenoxysulfid bezw. Kohlendioxyd und Schwefelwasserstoff.



Mit Ammoniak oder Aminen vereinigen sich die Senföle wieder zu Alkylthioharnstoffen (s. S. 1159) und mit absolutem Alkohol zu Derivaten der Thiourethane (s. S. 1159).

Der in freier Form und in Form von Salzen unbekannten Isothiocyansäure S:C:NH isomer ist die Thiocyansäure oder Rhodanwasserstoffsäure N⋮C.SH, die man als Nitril der Kohlenmonothiolsäure HO.CO.SH auffassen kann. Diese Säure kennt man sowohl in freier Form als auch in Form von Estern und Salzen.

Von den Salzen dieser Säure, den sogenannten Rhodanmetallen, entstehen die Alkalisalze durch Schmelzen der Alkalicyanide mit Schwefel. N⋮C.K+S=N⋮C.S.K. Rhodanammonium entsteht analog beim Erwärmen von Cyanammoniumlösung mit Schwefel oder von Blausäure mit gelbem Schwefelammonium, bequemer aber beim Erwärmen von Schwefelkohlenstoff mit alkoholischem Ammoniak, wobei als Zwischenprodukt dithiokarbaminsaures Amonium auftritt (s. S. 1159).



Die in Wasser meist unlöslichen Rhodansalze der Schwermetalle entstehen aus den Alkalisalzen durch Fällung.

Die freie Rhodanwasserstoffsäure bildet bei 0° eine farblose Kristallmasse, die bei ca. +5° schmilzt und sich bei gewöhnlicher Temperatur unter Wärmeentwickelung zu gelben Nadeln polymerisiert.

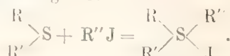
Die normalen Thiocyansäureester oder Rhodanalkyle entstehen aus Rhodankalium mit Halogenalkylen und aus Chlorcyan mit Merkaptiden. Sie lagern sich beim Erhitzen in die isomeren Senföle (s. oben) um.

Der Zusammenhang zwischen den vorstehend behandelten geschwefelten Kohlensäuren und ihren stickstoffhaltigen Derivaten ergibt sich aus folgender Zusammenstellung:

Tabelle siehe nächste Seite.

4. Organische Sulfoverbindungen. Wie schon erwähnt (S.1148), sollen als Sulfoverbindungen alle diejenigen Schwefelverbindungen besprochen werden, in denen der Schwefel als vier- und sechswertiges Element vorhanden ist. Es sind dies fast durchweg Verbindungen, in denen der Schwefel direkt an Sauerstoff gebunden ist. Nur in den durch Addition von Halogenalkylen an Thioäther (s. S. 1149 und 1156) entstehenden Sulfoniumhaloiden ist dies nicht der Fall, doch sind auch diese Körper als Halogenwasserstoffsalze solcher Schwefel-Sauerstoffverbindungen, der Sulfoniumhydroxyde anzusehen. Alle übrigen organischen Sulfoverbindungen kann man, wie aus der früher (S. 1150) gegebenen Zusammenstellung hervorgeht, als Alkylderivate von Schwefeloxydhydraten auffassen.

4a) Sulfoniumverbindungen. Schon bei den Thioäthern (S. 1149 und 1156) ist gesagt worden, daß dieselben imstande sind, Alkyljodide zu addieren, indem das Schwefelatom vierwertig wird



Die so entstehenden Trialkylsulfoniumjodide oder, wie sie früher weniger gut genannt wurden, Trialkylsulfinjodide, lassen sich durch doppelte Umsetzung in andere Salze überführen. Alle diese Salze

Anhydrid	Säure	Monamid	Diamid	Imid	Iminoamid	Nitril
O:C:S Kohlenoxysulfid	$O:C<^{OH}_{SH}$ Kohlenmonothiolsäure	$O:C<^{NH_2}_{SH}$ Karbaminthiolsäure	(Harnstoff)	(Isocyansäure)	$HN:C<^{NH_2}_{SH}$ ψ-Thioharnstoff[1])	$N⋮C·SH$ Rhodanwasserstoffsäure[2])
S:C:O Kohlenoxysulfid	$S:C<^{OH}_{OH}$ Thionkohlensäure	$S:C<^{NH_2}_{OH}$ Xanthogenaminsäure[3])	$S:C<^{NH_2}_{NH_2}$ Thioharnstoff	S:C:NH Isothiocyansäure[4])	(ψ-Harnstoff)	(Cyansäure)
S:C:S Schwefelkohlenstoff	$S:C<^{OH}_{SH}$ Dithiokarbonsäure[5])	$S:C<^{NH_2}_{SH}$ Dithiokarbaminsäure[6])	do.	do.	$HN:C<^{NH_2}_{SH}$ ψ-Thioharnstoff	$N⋮C·SH$ Rhodanwasserstoffsäure

[1]) S-Alkylverbindungen: Alkyl-Ψ-thioharnstoffe.
[2]) S-Alkylverbindungen: Rhodanalkyle.
[3]) O-Alkylverbindungen: Thiourethane, Xanthogenamide.
[4]) N-Alkylverbindungen: Senföle.
[5]) O-Alkylverbindungen: Xanthogensäuren.
[6]) S-Alkylverbindungen: Dithiourethane.

sind neutral und in wässeriger Lösung fast ebenso stark ionisiert wie die Ammoniumsalze. Wie letztere (vgl. den Artikel „Ammoniakderivate“ Bd. I S. 275) liefern auch die Sulfoniumsalze in wässeriger Lösung mit feuchtem Silberoxyd stark alkalisch reagierende Lösungen, aus denen sich durch Eindunsten im Vakuum die zugrunde liegenden Basen, die Sulfoniumhydroxyde



als zerfließliche Kristalle erhalten lassen. Dieselben zeigen fast vollständig das gleiche Verhalten wie die fixen Alkalien, gehören also zu den stärksten bekannten Basen. Beim Erhitzen zersetzen sie sich teilweise in Dialkylsulfid, Olefin und Wasser, Triäthylsulfoniumhydroxyd also z. B. in Diäthylsulfid, Aethylen und Wasser.

Von besonderem Interesse ist es, daß Sulfoniumverbindungen mit untereinander verschiedenen Radikalen mit Hilfe von aktiven Kampfersulfosäuren in zwei enantiostereomere optisch aktive Formen gespaltet werden können, daß ein derartiges vierwertiges Schwefelatom also dem asymmetrischen Kohlenstoff gleicht.

4b) Sulfoxyde. Wenn man Dialkylsulfide mit Salpetersäure oxydiert, erhält man unbeständige Nitrate der Sulfoxyde, die durch Karbonate oder auch schon durch Wasser zerlegt werden.



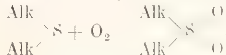
$$(Alk)_2S + O = (Alk)_2S:O.$$

Diphenylsulfoxyd $(C_6H_5)_2SO$ entsteht auch aus Thonyilchlorid (s. S. 1153) oder Schwefeldioxyd und Benzol bei Gegenwart von Aluminiumchlorid.

Die freien Sulfoxyde sind neutrale, farb- und geruchlose Körper. Die beiden niedrigsten Glieder sind bei gewöhnlicher Temperatur flüssig, während das Propylsulfoxyd bei + 15° schmilzt. Durch naszierenden Wasserstoff werden die Sulfoxyde wieder zu Thioäthern reduziert.

Wenn man Dialkyldisulfide mit Salpetersäure oxydiert (vgl. S. 1156), entstehen sogenannte Alkyldisulfoxyde (s. S. 1165), die aber nicht analog konstituiert sind und besser als Ester der Thiosulfonsäuren bezeichnet werden.

4c) Sulfone, Disulfone und Trisulfone. Wenn man Thioäther oder deren erste Oxydationsprodukte, die oben besprochenen Sulfoxyde, stärker oxydiert, was mit Hilfe von rauchender Salpetersäure oder von Kaliumpermanganat geschieht, so erhält man Dialkylsulfone



Dieselben entstehen auch aus den Salzen der Sulfinsäuren (S. 1162) mit Halogenalkylen oder ätherschwefelsauren Salzen und können daher auch als Ester der Sulfinsäuren oder der symmetrischen Form der hypothetischen Sulfoxylsäure (vgl. S. 1150 und 1152) angesehen werden (vgl. jedoch S. 1162). Letzterer Auffassung entspricht die Tatsache, daß Dimethylsulfon auch aus Natriumhydrosulfit (vgl. S. 1153) mit Dimethylsulfat gebildet wird. Rein aromatische Sulfone wie Diphenylsulfon (Sulfobenzid) $(C_6H_5)_2SO_2$ entstehen auch aus aromatischen Kohlenwasserstoffen mit Sulfurylchlorid (s. S. 1153) oder Benzol-

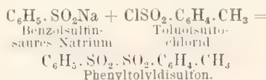
sulfochlorid bei Gegenwart von Aluminiumchlorid oder noch bequemer bei der Einwirkung von rauchender Schwefelsäure oder SO_3 auf Benzolkohlenwasserstoffe.

Die Sulfone sind farb- und geruchlose, sehr beständige Verbindungen, die gut kristallisieren und sich unzersetzt destillieren lassen. Die höheren Glieder sind unlöslich in Wasser. Sie sind im Gegensatz zu den Sulfoxyden meist nicht wieder zu Thioäthern reduzierbar. Doch beweist gerade die Tatsache, daß aus manchen Sulfonen (s. S. 1155) durch Reduktion Thioäther entstehen, die Konstitution der Sulfone in dem Sinne, daß in ihnen beide Alkylgruppen direkt an Schwefel gebunden sind. Sie sind auch gegen verseifende Agentien äußerst beständig und verhalten sich insofern nicht wie wahre Ester (vgl. S. 1151).

Als Disulfone bezeichnet man Verbindungen, welche die Gruppe SO_2 zweimal enthalten. Wichtig sind nur diejenigen Disulfone, in denen die beiden SO_2-Gruppen einseitig an dasselbe Kohlenstoff gebunden enthalten, wie sie sich durch Oxydation der Merkaptale und Merkaptole (s. S. 1156) mit Kaliumpermanganat darstellen lassen



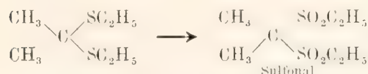
Doch kennt man in der aromatischen Reihe auch Disulfone, in denen die beiden SO_2-Gruppen direkt aneinander haften. Solche Verbindungen entstehen durch Umsetzung von sulfinsauren Salzen (s. unten) mit Sulfochloriden (s. S. 1164).



$C_6H_5.SO_2Na + ClSO_2.C_6H_4.CH_3 =$ (Benzolsulfinsaures Natrium; Toluolsulfochlorid)
$C_6H_5.SO_2.SO_2.C_6H_4.CH_3$
Phenyltolyldisulfon.

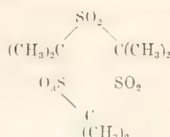
Verbindungen dieser Art besitzen keine größere Bedeutung.

Von den vorher erwähnten Disulfonen sind einige aus Merkaptolen durch Oxydation erhaltene als Schlafmittel von großer Wichtigkeit geworden, so das Sulfonal, das Oxydationsprodukt des Acetondiäthylmerkaptols



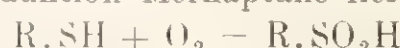
und die ihm nahe verwandten Stoffe Trional und Tetronal. Diese Disulfone sind sehr beständige, farb- und geruchlose kristallinische Substanzen.

Diesen Disulfonen nahe verwandt sind die aus den Trithioaldehyden und Trithioketonen (s. S. 1157) analog durch Oxydation mit Kaliumpermanganat entstehenden ringförmigen Trisulfone, so das dem Trithioaceton entsprechende Trisulfonaceton.



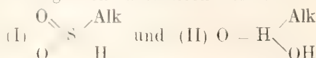
Natürlich bezeichnet man auch alle übrigen Verbindungen, welche die Gruppe C—SO_2—C dreimal enthalten, als Trisulfone.

4d) Sulfinsäuren und deren Ester. Sulfinsäuren nennt man Körper von der Zusammensetzung Alk . SO_2H. Ueber ihre Konstitution ist mit Sicherheit zu sagen, daß in ihnen die Alkylgruppe direkt an Schwefel gebunden ist, da sie durch Oxydation von Merkaptanen entstehen, oder durch Reduktion Merkaptane liefern

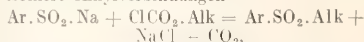


$$R.SH + O_2 = R.SO_2H$$

und ihre Alkylgruppe durch Verseifung nicht abspaltbar ist (vgl. S. 1151). Man hat sie also als Monoalkylverbindungen der hypothetischen Sulfoxylsäure (s. S. 1150 und 1152) aufzufassen. Zwischen den beiden hiernach noch möglichen tautomeren Formeln

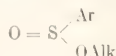


läßt sich keine sichere Entscheidung treffen. Zwar liefern die sulfinsauren Salze mit Halogenalkylen Sulfone (s. S. 1161), d. h. Verbindungen, in denen beide Alkylgruppen direkt an Schwefel gebunden sind, reagieren also im Sinne der Formel I, doch liefern die gleichen sulfinsauren Salze (der aromatischen Reihe) mit Chlorkohlensäureester unter Kohlensäureabspaltung ganz andersartige isomere Alkylverbindungen



$$Ar.SO_2.Na + ClCO_2.Alk = Ar.SO_2.Alk + NaCl + CO_2,$$

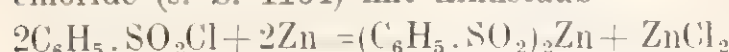
die sich von den Sulfonen dadurch unterscheiden, daß sie die neu eingetretene Alkylgruppe durch Verseifung leicht wieder abspalten und durch Oxydation in Sulfosäureester überführbar sind. Beides beweist, daß in diesen Verbindungen die zweite Alkylgruppe nicht an Schwefel, sondern an Sauerstoff gebunden ist, was der Formel II entspricht. Nur die verseifbaren Alkylverbindungen letzterer Art von der Formel



pflegt man als Sulfinsäureester zu bezeichnen, während die Sulfone gewöhnlich als solche benannt werden. Die wahren Sulfinsäureester entstehen auch beim Verestern der freien Sulfinsäuren mit Alkohol und Chlorwasserstoff.

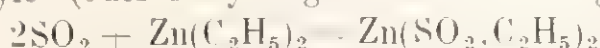
Die Sulfinsäuren entstehen in Form ihrer

Zinksalze bei der Reduktion der Sulfochloride (s. S. 1164) mit Zinkstaub



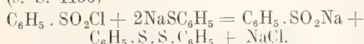
$$2C_6H_5.SO_2Cl + 2Zn = (C_6H_5.SO_2)_2Zn + ZnCl_2$$

und bei der Einwirkung von Schwefeldioxyd (oder Sulfurylchlorid) auf Zinkalkyle (oder Alkylmagnesiumverbindungen)



$$2SO_2 + Zn(C_2H_5)_2 = Zn(SO_2.C_2H_5)_2$$

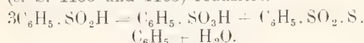
Auch bei der Einwirkung von Sulfochloriden auf Merkaptane in alkalischer Lösung entstehen sulfinsaure Salze neben Disulfiden (s. S. 1156)



$$C_6H_5.SO_2Cl + 2NaSC_6H_5 = C_6H_5.SO_2Na + C_6H_5.S.S.C_6H_5 + NaCl.$$

Aliphatische Sulfinsäuren entstehen auch durch Oxydation der trockenen Natriummerkaptide an der Luft, aromatische auch aus Diazoniumsalzen mit Schwefeldioxyd und Kupferpulver.

Die freien Sulfinsäuren der aliphatischen Reihe sind sirupartige, die der aromatischen Reihe gut kristallisierende, nicht sehr beständige Verbindungen. Durch Reduktion können sie in Merkaptane (S. 1155), durch Oxydation in Sulfosäuren (S. 1164) übergeführt werden. Beim Erhitzen mit Wasser werden sie zum Teil zu Sulfosäure oxydiert, zum Teil zu den sogenannten Disulfoxyden (s. S. 1153 und 1165) reduziert.

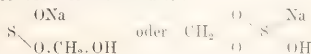


$$3C_6H_5.SO_2H = C_6H_5.SO_3H + C_6H_5.SO_2.S.C_6H_5 + H_2O.$$

Mit Schwefel verbinden sich die Salze der Sulfinsäuren zu thiosulfosauren Salzen (s. S. 1165).

4e) Additionsverbindungen der hydroschwefligen Säure und der Sulfoxylsäure. Weder von der hydroschwefligen Säure (S. 1153), noch von der Sulfoxylsäure (S. 1152) sind eigentliche Ester bekannt, doch zeigen die Salze dieser Säuren, ähnlich wie das Natriumbisulfit (s. S. 1165), die Fähigkeit mit Aldehyden esterartige Additionsprodukte zu liefern. Hier sind namentlich die vom Formaldehyd abgeleiteten Produkte als haltbare, kräftig wirkende Reduktionsmittel für die Textilindustrie und Färberei wichtig geworden.

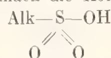
Wenn man formaldehydschwefligsaures Natrium (das Additionsprodukt von Natriumbisulfit an Formaldehyd) mit der für ein Atomgewicht Zink berechneten Menge Zinkstaub reduziert oder auch direkt Formaldehyd mit Natriumhydrosulfit in neutraler Lösung kombiniert, erhält man ein Formaldehydhydrosulfit von der Zusammensetzung 2 CH_2O, $Na_2S_2O_4$, 4 H_2O, das unter dem Namen „Hydrosulfit N.F." oder „Hyraldit" als Aetzmittel für den Kattundruck von Bedeutung geworden ist. Dasselbe ist ein Gemenge oder eine Verbindung von formaldehydschwefligsaurem Natrium und formaldehydsulfoxylsaurem Natrium und läßt sich durch fraktionierte Kristallisation in diese beiden Bestandteile zerlegen. Das formaldehydsulfoxylsaure Natrium, d. h. ein Additionsprodukt aus Formaldehyd und dem Natriumsalz der hypothetischen Sulfoxylsäure von der Konstitution



$$S\begin{matrix}ONa \\ O.CH_2.OH\end{matrix} \quad \text{oder} \quad CH_2\begin{matrix}O \\ O\end{matrix}S\begin{matrix}Na \\ OH\end{matrix}$$

bildet mit zwei Molekülen Wasser große rhombische Tafeln und dient unter dem Namen „Rongalit C" (CH_2O, $NaHSO_2$, 2 H_2O) als noch kräftigeres Reduktionsmittel den gleichen Zwecken wie das Hyraldit. Rongalit C entsteht direkt, wenn man formaldehydschwefligsaures Natrium (s. S. 1165) mit zwei Atomgewichten Zinkstaub reduziert oder wenn man Formaldehyd mit Natriumhydrosulfit in alkalischer Lösung kombiniert. Ein ähnliches Produkt aus Zinksulfoxylat und Formaldehyd wird als „Dekrolin" ($ZnSO_2$, CH_2O) zum Abziehen der Farben von gebrauchten Textilstoffen benutzt.

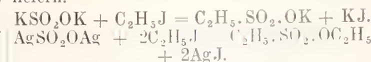
4f) Sulfosäuren und deren Ester. Die Konstitution der Sulfosäuren von der allgemeinen Formel $Alk.SO_3H$ geht daraus hervor, daß dieselben durch Oxydation von Merkaptanen oder Sulfinsäuren entstehen und durch Reduktion wieder in diese Körper übergeführt werden können. Daraus folgt, daß die Alkylgruppe der Sulfosäuren direkt an Schwefel gebunden ist, welcher Annahme ihre Beständigkeit gegen verseifende Agentien (vgl. S. 1151) entspricht. Sie haben demnach die Konstitution



$$\begin{matrix}Alk—S—OH \\ \;\;O\;\;\;O\end{matrix}$$

sind also Monoalkylderivate der asymmetrischen Form der schwefligen Säure (s. S. 1150 und 1164) werden aber ihrer Nichtverseifbarkeit entsprechend nicht als Ester der schwefligen Säure bezeichnet; letztere Bezeichnung ist vielmehr auf die Alkylderivate der symmetrischen schwefligen Säure beschränkt. Ersetzt man das in den Sulfosäuren noch vorhandene Wasserstoffatom ebenfalls durch eine Alkylgruppe, so ist in den so entstehenden Sulfosäureestern $Alk.SO_2.OAlk$ die letzteingeführte, an Sauerstoff gebundene Alkylgruppe natürlich durch Verseifung abspaltbar.

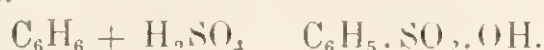
Die Alkalisalze der Sulfonsäuren entstehen bei der Einwirkung von Jodalkylen auf die Alkalisalze der schwefligen Säure, während die Silbersalze der schwefligen Säure in gleicher Weise Sulfosäureester liefern.



$$KSO_2OK + C_2H_5J = C_2H_5.SO_2.OK + KJ.$$
$$AgSO_2OAg + 2C_2H_5J = C_2H_5.SO_2.OC_2H_5 + 2AgJ.$$

Die Sulfosäuren entstehen auch durch Umlagerung aus den Estern der (symmetrischen) schwefligen Säure (s. S. 1164). Diese Bildungsweisen sind natürlich auf die aliphatischen Sulfosäuren beschränkt. Ferner entstehen die Sulfosäuren bei der Einwirkung von konzentrierter oder rauchender

Schwefelsäure auf Kohlenwasserstoffe. Während diese Darstellungsmethode in der aliphatischen Reihe nur ausnahmsweise anwendbar ist, wird sie zur Gewinnung der aromatischen Sulfosäuren fast ausschließlich benutzt.



$$C_6H_6 + H_2SO_4 \quad C_6H_5.SO_2.OH.$$

Diese als „Sulfurieren" oder „Sulfieren" bezeichnete Einführung der Sulfosäuregruppe $-SO_3H$ für ein aromatisches Wasserstoffatom gehört zu den wichtigsten Methoden der chemischen Technik.

Bei energischerer Einwirkung der Schwefelsäure können in einem aromatischen Kern auch mehrere Sulfosäuregruppen eintreten, d. h. es entstehen Disulfosäuren, Trisulfosäuren usw. Außerdem kann man natürlich durch Einwirkung von Schwefelsäure auf die verschiedensten Derivate aromatischer Kohlenwasserstoffe zahllose Sulfosäuren von komplizierterer Zusammensetzung erhalten. Technisch wichtig sind namentlich die Phenolsulfosäuren, Aminosulfosäuren und die als „Azofarbstoffe" benutzten Azosulfosäuren. Aromatische Sulfosäuren bezw. deren Chloride entstehen auch bei der Einwirkung von Chlorsulfonsäure (s. S. 1153) auf Kohlenwasserstoffe und aus Diazoaminoverbindungen beim Kochen mit schwefliger Säure (s. Bd. I, S. 759). Lediglich theoretisches Interesse besitzt die Bildung der Sulfosäuren bei der Oxydation der Merkaptane und der Sulfinsäuren (s. S. 1163).

Die Sulfosäuren sind stark saure, in Wasser leicht lösliche Verbindungen, die zum Teil nur schwierig kristallisierbar sind und daher meist in Form ihrer Salze aus den wässerigen Lösungen abgeschieden werden. Praktisch wichtig sind nur die aromatischen Sulfosäuren.

Die Wichtigkeit der Sulfosäuren für die Farbstofftechnik beruht darauf, daß man einen in Wasser unlöslichen und daher nicht direkt verwendbaren Farbstoff durch Einführung der Sulfosäuregruppe wasserlöslich machen kann.

Von den Umsetzungen der Sulfosäuren ist technisch wichtig namentlich ihre Ueberführbarkeit in Phenole (oder Alkohole) beim Schmelzen mit Alkali. Während also die Sulfosäuren durch Kochen mit wässerigem Alkali nicht verseift werden, wird bei höherer Temperatur die Sulfosäuregruppe unter Abspaltung von Alkalisulfit durch die Hydroxylgruppe ersetzt



$$C_6H_5.SO_3K + KOH \quad C_6H_5.OH + K_2SO_3.$$

Diese Umsetzung wird als bequemste Darstellungsmethode für viele wichtige Phenole technisch in allergrößtem Maßstabe ausgeführt.

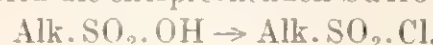
Von Bedeutung ist außerdem noch, daß man durch trockene Destillation oder durch Behandeln mit überhitztem Wasserdampf und noch auf andere Weise die aromatischen Sulfosäuren wieder in die zugrunde liegenden Kohlenwasserstoffe überführen kann.



$$C_6H_5.SO_3H \quad C_6H_6 + SO_3.$$

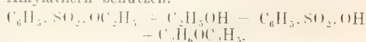
Weniger wichtig ist es, daß man die Sulfosäuregruppe auch durch Chlor, durch die Nitrogruppe oder auch durch die Aminogruppe ersetzen kann (Erhitzen mit Phosphorpentachlorid bezw. Salpetersäure oder Natriumamid).

Bei niedrigerer Temperatur liefern die Sulfosäuren oder deren Alkalisalze mit Phosphorpentachlorid die entsprechenden Sulfochloride,



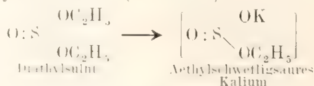
$$Alk.SO_2.OH \rightarrow Alk.SO_2.Cl,$$

aus denen man in gewohnter Weise die Sulfosäureester, Sulfamide und andere Säurederivate herstellen kann. Daß die Sulfochloride bei der Reduktion zunächst Sulfinsäuren liefern, ist schon (S. 1162) erwähnt worden. Die Sulfosäureester zersetzen sich beim Erhitzen mit Alkoholen unter Bildung von Alkyläthern und der freien Sulfosäure. Man kann daher die Sulfosäuren oder deren Chloride zur Gewinnung von Alkyläthern benutzen.



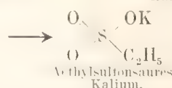
$$C_6H_5.SO_2.OC_2H_5 + C_2H_5OH = C_6H_5.SO_2.OH + C_2H_5OC_2H_5.$$

4g) Ester der schwefligen Säure, alkylschweflige Säuren und Natriumbisulfitverbindungen der Aldehyde und Ketone. Wie schon (S. 1163) erwähnt worden ist, bezeichnet man als neutrale Ester der schwefligen Säure (Dialkylsulfite) nur die Alkylderivate der symmetrischen schwefligen Säure (s. S. 1150 und 1152), denen beide Alkylgruppen an Sauerstoff in gebunden sind, und die dementsprechend (s. S. 1151) verseifbar sind. Merkwürdigerweise tritt diese Verseifung mit Alkalien hier nur sehr schwierig ein und führt in erster Stufe nicht zu den Salzen der alkylschwefligen Säuren (s. unten), sondern zu deren Umlagerungsprodukten, den Salzen der entsprechenden Alkylsulfonsäuren (s. S. 1163)



$$O:S\begin{matrix}OC_2H_5\\OC_2H_5\end{matrix} \longrightarrow \left[O:S\begin{matrix}OK\\OC_2H_5\end{matrix}\right]$$

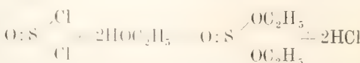
Diäthylsulfit — Aethylschwefligsaures Kalium



$$\longrightarrow \begin{matrix}O\\O\end{matrix}S\begin{matrix}OK\\C_2H_5\end{matrix}$$

Aethylsulfonsaures Kalium.

Die Dialkylsulfite entstehen aus Thionylchlorid und den entsprechenden Alkoholen

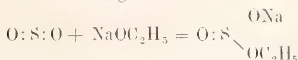


$$O:S\begin{matrix}Cl\\Cl\end{matrix} + 2HOC_2H_5 \quad O:S\begin{matrix}OC_2H_5\\OC_2H_5\end{matrix} + 2HCl$$

und sind pfefferminzähnlich riechende, in Wasser unlösliche Flüssigkeiten.

Die sauren Ester der symmetrischen schwefligen Säure oder der alkylschwefligen Säuren sind in freiem Zustande nicht bekannt, sondern zerfallen sofort in SO_2 und Alkohol. Ihre Alkalisalze, die, wie oben erwähnt, durch Verseifung der neutralen Ester nicht erhältlich sind, entstehen aus

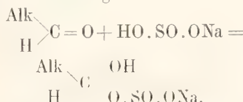
den Alkalialkoholaten in Alkohol mit trockener schwefliger Säure



Analog liefert alkoholisches Ammoniak beim Einleiten von schwefliger Säure äthylschwefligsaures Ammonium. Die alkylschwefligsauren Salze zerfallen in wässeriger Lösung leicht in Alkohol und Alkalisulfit. Durch manche Salze, namentlich aber durch Jodkalium, werden sie in die stabileren alkylsulfonsauren Salze umgelagert.

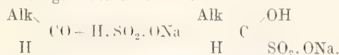


Als alkylschwefligsaure Salze der an sich unbeständigen „Orthoaldehyde", d. h. zweiwertigen Alkohole, deren beide Hydroxylgruppen an einem Kohlenstoffatom stehen, faßt man die Natriumbisulfitverbindungen der Aldehyde und Ketone auf. Sie entstehen aus allen Aldehyden und aus manchen, jedoch nicht allen Ketonen beim Schütteln mit kalter konzentrierter Natriumbisulfitlösung



Sie bilden meist kristallinische, in Wasser ziemlich leicht, in Alkohol dagegen wenig lösliche Niederschläge, aus denen die Aldehyde oder Ketone durch Erwärmen mit Alkalikarbonat oder mit verdünnten Säuren zurückgewonnen werden. Sie werden häufig zur Identifizierung oder Reindarstellung von Aldehyden und Ketonen benutzt.

Von den Ketonen scheinen besonders die Methylalkylketone $CH_3.CO.Alk$ zur Bildung von Bisulfitverbindungen befähigt zu sein. Die Bisulfitverbindungen liefern mit Cyankalium die Cyanhydrine der betreffenden Aldehyde oder Ketone. Bei der Reduktion liefern sie Derivate der Sulfoxylsäure (s. S. 1163). Das ganze Verhalten charakterisiert die Bisulfitverbindungen als Derivate der symmetrischen schwefligen Säure von der oben angeführten Konstitution, während man sie früher als Alkalisalze von α-Oxyalkylsulfonsäuren, d. h. als Derivate der asymmetrischen schwefligen Säure auffaßte.



Diese Auffassung kann jetzt endgültig als falsch angesehen werden, seitdem festgestellt ist, daß das Natriumsalz der Oxymethansulfosäure von dem Formaldehydnatriumbisulfit verschieden ist.

4h) Thiosulfonsäuren und deren Ester (Alkyldisulfoxyde). Die in freiem Zustande nicht existenzfähigen Alkylthiosulfosäuren sind als Sulfosäuren (s. S. 1163) aufzufassen, deren Hydroxylsauerstoffatom durch Schwefel ersetzt ist (vgl. S. 1153). Sie haben also die Konstitution



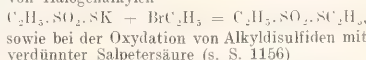
Ihre Salze entstehen aus den Sulfosäurechloriden (s. S. 1164) mit Schwefelkalium.



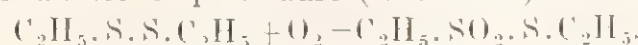
Daß die Salze aromatischer Thiosulfosäuren auch aus den Salzen der Sulfinsäuren mit Schwefel entstehen, ist schon (S. 1163) erwähnt worden.

Die Salze der aromatischen Thiosulfosäuren liefern mit Jod Trithion-, Tetrathion- und Pentathionverbindungen, welche den gewöhnlichen Polythionsäuren analog gebaut sind.

Die früher als Alkyldisulfoxyde bezeichneten Ester der Alkylthiosulfosäuren entstehen aus deren Alkalisalzen durch Einwirkung von Halogenalkylen



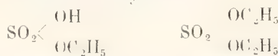
sowie bei der Oxydation von Alkyldisulfiden mit verdünnter Salpetersäure (s. S. 1156)



Rein aromatische Disulfoxyde, d. h. Phenolester der Arylthiosulfosäuren entstehen, wie schon früher (S. 1163) gesagt worden ist, beim Erhitzen der Sulfinsäuren mit Wasser.

Es sind in Wasser unlösliche, widerwärtig riechende Flüssigkeiten.

4i) Ester der Schwefelsäure. Die Schwefelsäure kann als zweibasische Säure saure und neutrale Ester bilden. Erstere, die Monoalkylester der Schwefelsäure, werden entsprechend ihrer Säurenatur auch als Alkylschwefelsäuren oder Aetherschwefelsäuren bezeichnet. Die neutralen Ester heißen Dialkylsulfate



Die aliphatischen Alkylschwefelsäuren werden meist durch Mischen der Alkohole mit konzentrierter Schwefelsäure gewonnen.

$$C_2H_5OH + H_2SO_4 = C_2H_5O.SO_2.OH + H_2O.$$

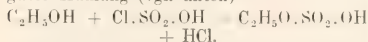
Da die Reaktion niemals vollständig ist, müssen die Aetherschwefelsäuren durch Darstellung ihrer in Wasser leicht löslichen Baryum- oder Bleisalze von der überschüssigen Schwefelsäure getrennt und aus diesen Salzen durch die berechnete Menge Schwefelsäure oder durch Schwefelwasserstoff wieder in Freiheit gesetzt werden.

Auch sekundäre und tertiäre Alkohole bilden bei vorsichtiger Kühlung Aetherschwefelsäuren, doch sind diese sehr unbeständig.

Aromatische Alkylschwefelsäuren lassen sich nach dieser Methode nicht gewinnen, weil die Schwefelsäure auf die Phenole zu leicht sulfurierend (vgl. S. 1164) wirkt. Die Kaliumsalze der Phenolschwefelsäuren lassen sich aber durch Einwirkung von Kaliumpyrosulfat auf die konzentrierten Lösungen der Kaliumphenolate gewinnen.

$$K_2S_2O_7 + C_6H_5OK = C_6H_5O.SO_2.OK + K_2SO_4.$$

Alkylschwefelsäuren entstehen auch aus Alkoholen und Chlorsulfonsäure (S. 1153) bei guter Kühlung (vgl. unten)



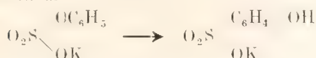
$$C_2H_5OH + Cl.SO_2.OH = C_2H_5O.SO_2.OH + HCl.$$

Auch Phenolschwefelsäure entsteht aus Phenol und Chlorsulfonsäure in Schwefelkohlenstoff bei Gegenwart von Pyridin.

Aliphatische Aetherschwefelsäuren entstehen ferner durch Anlagerung von konzentrierter Schwefelsäure an Olefine.

Die Aetherschwefelsäuren bilden dickliche, zuweilen kristallisierbare Flüssigkeiten, die bei der Destillation zerfallen. Sie sind in Wasser und Alkohol leicht, in Aether dagegen nicht löslich. Die Phenolschwefelsäuren kennt man nur in Form ihrer Alkalisalze, da sie in freiem Zustande sogleich in Phenol und Schwefelsäure zerfallen. Einen analogen Zerfall erleiden auch die aliphatischen Alkylschwefelsäuren in wässeriger Lösung beim Erhitzen, sowie allmählich bei gewöhnlicher Temperatur. Beim Erhitzen für sich zerfallen die aliphatischen Aetherschwefelsäuren in Schwefelsäure und Olefine oder Dialkylsulfate, beim Erhitzen mit Alkoholen bilden sie einfache oder gemischte Aether neben Schwefelsäure.

Die Salze der Aetherschwefelsäuren sind meist gut kristallisierbar und lösen sich leicht in Wasser. Beim Kochen mit Wasser zerfallen sie in Sulfat und Alkohol. Die Alkalisalze der aromatischen Alkylschwefelsäuren lagern sich beim Erhitzen in trockenem Zustande in die Salze der Phenolsulfosäuren um

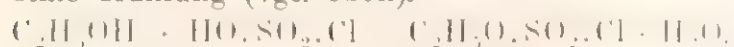


Die Alkalisalze der aliphatischen Aetherschwefelsäuren lassen sich ebenso wie die Alkylhalogenide als Alkylierungsmittel verwenden, sind aber für diesen Zweck jetzt von den Halogenalkylen und Dialkylsulfaten (s. unten) verdrängt worden. Beim Erhitzen mit organischen Alkaliverbindungen ersetzen sich deren Metallatome durch eine Alkylgruppe.



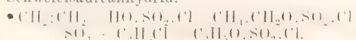
$$NCK + KO.SO_2.OAlk = NC.Alk + K_2SO_4.$$

Die **Chloride der Aetherschwefelsäuren** oder **Chlorsulfonsäureester** entstehen aus den ätherschwefelsauren Salzen mit Phosphorpentachlorid oder aus äquivalenten Mengen Sulfurylchlorid (s. S. 1153) und Alkohol oder auch beim Vermischen von Chlorsulfonsäure und Alkohol ohne Kühlung (vgl. oben).



$$C_2H_5OH + HO.SO_2.Cl = C_2H_5O.SO_2.Cl + H_2O.$$

Aethylschwefelsäurechlorid erhält man am besten durch Addition von Chlorsulfonsäure an Aethylen oder auch durch Addition von Chloräthyl an Schwefelsäureanhydrid.

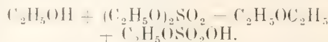


$$CH_2:CH_2 + HO.SO_2.Cl = CH_3.CH_2O.SO_2.Cl$$
$$SO_3 + C_2H_5Cl = C_2H_5O.SO_2.Cl.$$

Die Chloride sind stechend riechende Flüssigkeiten. Sie zersetzen sich mit Alkoholen stürmisch, mit Wasser in der Kälte langsam.

Die **Dialkylsulfate** entstehen neben den Aetherschwefelsäuren beim Erhitzen der Alkohole mit konzentrierter Schwefelsäure, sowie beim Erhitzen der Aetherschwefelsäuren für sich. Sie entstehen auch aus Sulfurylchlorid oder Chlorsulfonsäureestern (s. oben) mit Alkoholen oder Natriumalkoholaten, sowie aus Silbersulfat mit Halogenalkylen. Die wichtigen beiden niedrigsten Glieder dieser Reihe, das **Dimethylsulfat** und **Diäthylsulfat** werden aus den Alkoholen mit rauchender Schwefelsäure technisch hergestellt.

Die Dialkylsulfate sind farb- und geruchlose, in Wasser unlösliche Oele. Ihre Dämpfe sind sehr giftig und greifen die Schleimhäute stark an. Sie zersetzen sich mit Wasser in der Kälte langsam unter Bildung von Alkohol und Aetherschwefelsäure. Mit Alkoholen liefern sie beim Erwärmen Aetherschwefelsäuren und Aether



$$C_2H_5OH + (C_2H_5O)_2SO_2 = C_2H_5OC_2H_5 + C_2H_5OSO_2OH.$$

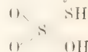
Letzteren Vorgang kann man als Ersatz des Hydroxylwasserstoffs im Alkohol durch eine Alkylgruppe auffassen. In gleicher Weise kann man mit Hilfe von Dimethylsulfat und Diäthylsulfat Wasserstoffatome in den verschiedensten Verbindungen durch Methyl- oder Aethylgruppen ersetzen.



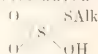
$$X.H + (AlkO)_2SO_2 = X.Alk + AlkOSO_2OH.$$

Die Dialkylsulfate wirken also ebenso wie die viel teureren Halogenalkyle als allgemeine Alkylierungsmittel und werden als solche vielfach benutzt.

4k) **Alkylthioschwefelsäuren.** Von der Thioschwefelsäure (s. S. 1150 und 1154) lassen sich entsprechend ihrer unsymmetrischen Struktur

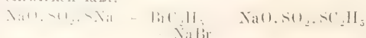


zwei verschiedene Reihen saurer Ester und neutrale Ester theoretisch ableiten. Von diesen drei Arten von Estern kennt man nur diejenigen, in denen das eine am Schwefel stehende Wasserstoffatom durch Alkyl ersetzt ist, die sogenannten **Alkylthioschwefelsäuren**



und auch diese sind nicht in freiem Zustande, sondern nur in Form von Salzen bekannt.

Man erhält die alkylthioschwefelsauren Salze, wenn man Halogenalkyle auf Natriumthiosulfat einwirken läßt.



$$NaO.SO_2.SNa + BrC_2H_5 = NaO.SO_2.SC_2H_5 + NaBr.$$

Weniger gut entstehen dieselben Salze bei der Einwirkung von Jod auf ein Gemenge von Natriummerkaptid (s. S. 1155) und Natriumsulfit.

$$NaO.SO_2.Na + NaSC_2H_5 + J_2 = NaO.SO_2.SC_2H_5 + 2\,NaJ.$$

Die Alkylthiosulfate sind schön kristallisierende, in Wasser und Alkohol lösliche Salze. Das äthylthioschwefelsaure Natrium führt nach seinem Entdecker den Namen „Buntesches Salz". Beim Erhitzen zerfallen die Salze in Natriumsulfat, Schwefeldioxyd und Dialkyldisulfide

$$2C_2H_5S.SO_2.ONa = (C_2H_5.S)_2 + SO_2 + Na_2SO_4.$$

Säuert man die Lösung der Alkylthiosulfate an, so zerfällt die freie Alkylthioschwefelsäure sofort in Merkaptan und Schwefelsäure.

Anhang. Beschreibung wichtiger Thio- und Sulfoverbindungen. 1. Merkaptane. Methylsulfhydrat CH_3SH. Sdp + 6°. Findet sich in den menschlichen Exkrementen und Darmgasen, sowie in anderen Produkten der Eiweißgärung. Aethylsulfhydrat C_2H_5SH. Sdp. 36°. d^{20} 0,829. 1833 von Zeise entdeckt. Wichtig für die technische Darstellung des Sulfonals und anderer Schlafmittel. — Quecksilbermerkaptid $Hg(SC_2H_5)_2$. Weiße Blättchen mit Alkohol. Fp. 76°. — Bleimerkaptid. $Pb(SC_2H_5)_2$. Gelber kristallinischer Niederschlag. Fp. 150°. n-Butylsulfhydrat. Sdp. 98°. Kommt im Drüsensekret des Stinkdachses vor. Cystein (β-Sulfhydryl-α-aminopropionsäure) $HS.CH_2.CH(NH_2).COOH$ entsteht durch Reduktion des physiologisch wichtigen Cystins, des zugehörigen Disulfids. Thiophenol C_6H_5SH. Sdp. 170°. d^{24} 1,078. Erzeugt unangenehme Hautaffektionen. Benzylsulfhydrat $C_6H_5.CH_2SH$. Sdp. 195°. d^{20} 1,058.

2. Thioäther. Methylsulfid $(CH_3)_2S$. Sdp. 38°. Aethylsulfid $(C_2H_5)_2S$. Sdp. 91°. Vinylsulfid $(C_2H_3)_2S$. Sdp. 101°. d 0,913. Bildet den Hauptbestandteil des Oels von Allium ursinum. Allylsulfid $(C_3H_5)_2S$. Sdp. 140°. Kommt nicht, wie früher angenommen wurde, im Knoblauch vor. Phenylsulfid $(C_6H_5)_2S$. Sdp. 296°. d^{15} 1,117. Benzylsulfid $(C_6H_5.CH_2)_2S$. Rhombische Tafeln. Fp. 50°. Siedet nicht unzersetzt. Acetondiäthylmerkaptol $(CH_3)_2C(SC_2H_5)_2$. Sdp. 190 bis 191°.

3. Disulfide und Polysulfide. Methyldisulfid $(CH_3)_2S_2$. Sdp. 112°. Aethyldisulfid $(C_2H_5)_2S_2$. Sdp. 151°. Allyldisulfid $(C_3H_5)_2S_2$. $Sdp._{16}$ 117°. Kommt neben anderen Polysulfiden im Knoblauch (Allium sativum) vor. Cystin, das Disulfid der β-Sulfhydryl-α-aminopropionsäure (des Cysteins) $S_2[-CH_2.CH(HN_2).COOH]_2$ ist physiologisch wichtig als Hauptbestandteil mancher Blasen- und Nierensteine und als Spaltungsprodukt von Proteinen. Farblose sechseckige Täfelchen. Zersetzt sich bei 258 bis 261°. Das natürliche Cystin ist optisch aktiv (linksdrehend). Phenyldisulfid $(C_6H_5)_2S_2$. Farblose Nadeln. Fp. 61°. $Sdp._{15}$ 190 bis 192°. Benzyldisulfid $(C_6H_5.CH_2)_2S_2$. Blättchen. Fp. 72°.

4. Thioaldehyde und Thioketone. Thiobenzophenon $(C_6H_5)_2CS$. Blaues Oel, das bei niederer Temperatur zu blauen Nadeln erstarrt. $Sdp._{14}$ 174°. Entsteht am besten aus Benzophenonchlorid und Schwefelkalium. Trithioacetaldehyd $(CH_3.CHS)_3$. Cis-Form. Fp. 101°. Sdp. 247°. Trans-Form. Fp. 126°. Sdp. 248°. Trithioaceton $(CH_3.CS.CH_3)_3$. Fp. 24°. $Sdp._{13}$ 130°.

5. Thiosäuren. Thioameisensäure ist eine leicht flüchtige und sehr zersetzliche Flüssigkeit. Thioessigsäure $CH_3.COSH$. Sdp. 93°. d^{10} 1,074. Diacetylsulfid $(CH_3.CO)_2S$. Hellgelbe, sehr unangenehm riechende Flüssigkeit. Sdp. 119 bis 120°. Diacetyldisulfid $CH_3.CO.S.S.CO.CH_3$. Farblose Kristalle von schwachem Geruch. Fp. 20°. Thiacetamid $CH_3.CSNH_2$. Farblose Tafeln. Fp. 108°. Thiobenzoesäure C_6H_5COSH. Fp. 24°. Benzoylsulfid $(C_6H_5.CO_2)S$. Fp. 48°. Benzoyldisulfid $(C_6H_5.CO)_2S_2$. Fp. 130°. Dithiobenzoesäure C_6H_5CSSH. Schweres, violettrotes, zersetzliches Oel. Thiobenzamid $C_6H_5.CSNH_2$. Fp. 116°. Thiobenzanilid $C_6H_5.CSNHC_6H_5$. Gelbe Prismen. Fp. 98°. Benzimidothioäthyläther $C_6H_5.C(:NH)SC_2H_5$. Zersetzliches Oel.

Geschwefelte Derivate der Kohlensäure. Schwefelkohlenstoff. 1796 von Lampadius entdeckt. In reinem Zustand nur sehr schwach riechende, farblose, stark lichtbrechende Flüssigkeit. Sdp. 47°. d^0 1,297. Kohlenoxysulfid COS. Findet sich in manchen Mineralquellen. Farbloses brennbares Gas. Thiophosgen $S:CCl_2$. Stechend riechende rote Flüssigkeit. Sdp. 73°. d^{15} 1,508. Wird technisch durch Reduktion des sogenannten Perchlormethylmerkaptans $CSCl_4$ gewonnen. Letzteres entsteht bei der Einwirkung von Chlor auf Schwefelkohlenstoff.

Thionkarbaminsäureäthylester (Thiourethan, Aethylxanthogenamid). Fp. 38°. Zersetzt sich beim Erhitzen in Merkaptan, Cyansäure und Cyanursäure. Thioharnstoff (Thiokarbamid $S:C(NH_2)_2$. 1869 von Reynolds durch Erhitzen von Rhodanammonium zuerst dargestellt. Dicke rhombische Prismen. Fp. 172°. Leicht löslich in Wasser. Reagiert neutral und schmeckt bitter. Aethylthioharnstoff $SC(NH_2)(NHC_2H_5)$. Fp. 113°. Sym. Diäthylthioharnstoff $SC(NHC_2H_5)_2$. Fp. 77°. Asym. Diäthylthioharnstoff $S:C[NH_2][N(C_2H_5)_2]$. Fp. 170°. Allylthioharnstoff (Thiosinamin) $SC(NH_2)(NHC_3H_5)$. Fp. 74°. Phenylthioharnstoff $SC(NH_2)(NHC_6H_5)$. Fp. 154°. Sym. Diphenylthioharnstoff (Sulfokarbanilid) $SC(NHC_6H_5)_2$. Farblose Blättchen. Fp. 151°. Thiosemikarbazid $SC(NH_2)(NH.NH_2)$. Fp. 181°. Wichtiges Reagens auf Aldehyde und Ketone.

Methylsenföl $SCNCH_3$. Fp. 34°. Sdp. 119°. Aethylsenföl $SCNC_2H_5$. Sdp. 133°. Allylsenföl (gewöhnliches Senföl) $SCNC_3H_5$. Sdp. 150,7°. d^{10} 1,017. Hauptbestandteil des bei der Destillation von schwarzem Senfsamen (Sinapis nigra) oder Meerrettig (Cochlearia armoracia) erhaltenen Oele. Ist im Senfsamen als Glukosid (Sinnigrin oder myronsaures Kalium) vorhanden, das durch ein Ferment Myrosin in Traubenzucker, Senföl und Monokaliumsulfat zerfällt. Phenylsenföl $SCNHC_6H_5$. Sdp. 222°. Rhodanwasserstoffsäure NCSH. Bei 0° weiße Kristallmasse. Fp. ca. +5°. Polymerisiert sich bei gewöhnlicher Temperatur. Findet sich in geringer Menge im menschlichen Magen. Die freie Säure und ihre löslichen Salze geben mit Eisenoxydsalzen eine äußerst intensive dunkelrote Färbung [Bildung von $Fe_2(SCN)_6 + 9KSCN$]. Von dieser höchst empfindlichen Reaktion haben die Rhodanverbindungen ihren Namen (ῥόδον = Rose). Rhodankalium. Farblose Nadeln. Sehr leicht löslich in Wasser. Rhodannatrium. Zerfließlich. Findet sich im Speichel und Harn verschiedener Tiere. Rhodanqueck-

silber. $Hg(SCN)_2$. Grauweißer amorpher Niederschlag. Verglimmt beim Anzünden unter starkem Aufschwellen (Pharaoschlange). Rhodansilber ähnelt dem Chlorsilber. Wichtig für die Silbertitration nach Volhard. Rhodanmethyl $NCSCH_3$. Sdp. 133°. d° 1,080. Rhodanäthyl $NCSC_2H_5$. Sdp. 142°. Rhodanallyl $NCSC_3H_5$. Sdp. 161° unter Umwandlung in Senföl.

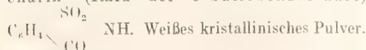
6. Sulfone. Dimethylsulfon $(CH_3)_2SO_2$. Fp. 190°. Sdp. 238°. Diäthylsulfon $(C_2H_5)_2SO_2$. Fp. 70°. Sdp. 248°. Diphenylsulfon (Sulfobenzid) $(C_6H_5)_2SO_2$. Fp. 128°. Sdp. 276°.

Disulfone. Sulfonal (Acetondiäthylsulton) $(CH_3)_2C(SO_2C_2H_5)_2$. Weißes geruchloses Kristallpulver. Fp. 126°. Von Baumann entdeckt und von Kast (1888) als Schlafmittel erkannt. Trional $(CH_3)(C_2H_5)C(SO_2C_2H_5)_2$. Fp. 75°. Tetronal $(C_2H_5)C(SO_2C_2H_5)_2$. Fp. 85°.

7. Derivate der hydroschwefligen Säure und der Sulfoxylsäure. Hydrosulfit NF., Hyraldit (Formaldehydhydrosulfit) $2CH_2O,\ Na_2S_2O_4 + 4H_2O$. Wichtiges Aetzmittel für den Kattundruck. Zerfällt durch Kristallisation in Formaldehydbisulfit und Rongalit C (Formaldehydnatriumsulfoxylat) $HO.CH_2.O.SONa + 2\,H_2O$ (?). Große wasserhelle tafelförmige Kristalle des rhombischen Systems. Wirkt noch kräftiger ätzend.

8. Sulfosäuren. Methylsulfosäure. $CH_3.SO_3H$. Farbloser Sirup. Wurde 1845 von Kolbe aus ihren Elementen synthetisch aufgebaut. Aethylsulfosäure $CH_3CH_2.SO_3H$. Zerfließliche kristallinische Masse. Taurin (Aminoäthylsulfosäure) $NH_2.CH_2.CH_2.SO_3H$. Von Gmelin entdeckt. Findet sich in der Galle des Ochsen und anderer Tiere, sowie in vielen anderen tierischen Organen verbunden mit Cholsäure, als Taurocholsäure, aus der es mit Salzsäure entsteht. Große farblose tetragonale Säulen oder monokline Prismen. Fp. über 240° unter Zersetzung. Wurde von Kolbe synthetisch erhalten aus Isäthionsäure (Oxäthylsulfosäure) $HO.CH_2.CH_2.SO_3H$, die ihrerseits in Form ihres Schwefelsäureesters (Aethionsäure) bezw. dessen Anhydrids (Karbylsulfat) aus Alkohol und Schwefelsäureanhydrid entsteht.

Benzolsulfosäure $C_6H_5.SO_3H$. Zerfließliche Tafeln mit 1½ Mol. Kristallwasser. Benzolsulfochlorid $C_6H_5.SO_2Cl$. Oel, das unter 0° erstarrt. Fp. 14,5°. Sdp. 120° (bei 10 mm). Benzolsulfamid $C_6H_5.SO_2NH_2$. Sublimierbare perlmutterglänzende Blättchen. Sulfanilsäure (p-Aminobenzolsulfosäure) $NH_2.C_6H_4.SO_3H$. Aus Anilin und rauchender Schwefelsäure. Rhombische Tafeln mit 1 Mol. Wasser. Wichtiges Ausgangsmaterial zur Darstellung von Azofarbstoffen (vgl. den Artikel „Farbstoffe"), deren wichtigste Repräsentanten zum Teil als komplizierte Sulfosäuren aufzufassen sind. Saccharin (Imid der o-Sulfobenzoesäure)



$C_6H_4 \langle {SO_2 \atop CO} \rangle NH$. Weißes kristallinisches Pulver. Etwa 300 mal süßer als Rohrzucker, als dessen Ersatz es dient.

9. Ester der Schwefelsäure. Methylschwefelsäure CH_3SO_4H. Dickes Oel. Aethylschwefelsäure $C_2H_5SO_4H$. Dicker Sirup. Bildet den wichtigsten Bestandteil der offizinellen Mixt. sulf. acida. — Kaliumsalz $C_2H_5SO_4K$. Wasserfreie monokline Tafeln. Phenylschwefelsäure. Ist in freiem Zustande nicht beständig. — Kaliumsalz $C_6H_5.SO_4K$. Blätterige Kristalle. In kaltem Wasser schwer löslich. Findet sich im Harn der Pflanzenfresser und in geringen Mengen auch im Menschen- und Hundeharn. Innerlich eingenommenes Phenol wird vom Tierkörper in dieser Form im Harn ausgeschieden.

Dimethylsulfat $(CH_3)_2SO_4$. Sdp. 188°. D[18] 1,327. Greift die Schleimhäute stark an und ist sehr giftig. Diäthylsulfat $(C_2H_5)_2SO_4$. Sdp. 208°. Sdp. (bei 15 mm Druck) 96°. Erstarrt bei ca. —25°. D[19] 1,184. Beide Ester werden vielfach als Alkylierungsmittel im Laboratorium und Technik an Stelle der teuren Halogenalkyle benutzt und werden technisch in großem Maßstabe hergestellt.

Literatur. ***Gmelin-Kraut,*** *Handbuch der anorganischen Chemie. Heidelberg 1905 bis 1911.* — ***Abegg,*** *Handbuch der anorganischen Chemie. Leipzig 1905 bis 1911.* — ***V. v. Richter,*** *Chemie der Kohlenstoffverbindungen. Bonn 1905 bis 1909.* — ***Meyer-Jacobson,*** *Lehrbuch der organischen Chemie. Leipzig 1902 bis 1911.* — ***Th. Posner,*** *Lehrbuch der synthetischen Methoden. Leipzig 1903.* — ***M. Scholtz,*** *Optisch-aktive Verbindungen des Schwefels. Stuttgart 1906.*

Th. Posner.

Thomsen

Julius.

Er ist am 16. Februar 1826 in Kopenhagen geboren und daselbst am 13. Februar 1909 gestorben, nachdem er zuerst an der Polytechnischen Lehranstalt, an der er seine Ausbildung erhalten hatte, dann an der Kgl. Militärhochschule und seit 1866 an der Universität als Professor der Chemie bis zum Jahre 1901 erfolgreich tätig gewesen war. Von 1882 bis 1903 war er zugleich Direktor der Polytechnischen Lehranstalt. Sein Hauptforschungsgebiet war die Thermochemie, in die er schon durch seine Jugendarbeiten Klarheit zu bringen suchte. Mit der erlangten Meisterschaft in Anstellung exakter Versuche hat Thomsen in seinen schaffensfreudigsten Jahren, 1866 bis 1888, das große Gebiet nach allen Richtungen hin bearbeitet. Schon frühzeitig stellte er den später von ihm selbst als nur angenähert gültig erkannten Satz auf, daß man in der Wärmeentwickelung bei Reaktionen ein Maß für die chemische Affinität habe. Das principe du travail maximum Berthelots (1869) ist wesentlich die gleiche Hypothese. Seine klassischen thermochemischen Untersuchungen sind in 4 Bänden herausgegeben worden (1882 bis 1886 Leipzig). Eine stark gekürzte Bearbeitung erschien 1906 (deutsch von J. Traube). Thomsens physikalische Arbeiten aus dem Gebiete der Elektrochemie und der Optik, sowie seine technische Betätigung bei der Ausbildung eines Verfahrens, aus Kryolith Soda und schwefelsaure Tonerde zu gewinnen, lassen seine Vielseitigkeit erkennen.

Die Arbeiten während der letzten 20 Jahre seines Lebens galten der Natur der Grundstoffe und weisen sowohl wichtige Atomgewichts-

bestimmungen als tiefgründige Spekulationen über die Einheit der Materie auf. Sein Leben und Wirken ist in dem von Niels Bjerrum geschriebenen Nekrolog fesselnd geschildert (Ber. d. chem. Ges. 42, 4971).

E. von Meyer.

Thomson
Sir Charles Wyville.

Geboren am 5. März 1830 in Bonsyde, Linlithgow, gestorben am 10. März 1882 daselbst, studierte an der Universität Edinburgh Medizin. Sein Hauptinteresse wandte er jedoch der Naturwissenschaft, besonders zuerst der Botanik zu. Schon 1850 wurde er Lecturer. 1851 Professor der Botanik in Aberdeen. Bald darauf 1853 erfolgte seine Ernennung zum Professor of Natural history in Queens College, Cork. In derselben Eigenschaft ging er nach Belfast, wo er bis 1868 blieb. Er ging dann an das Royal College of Science in Dublin über, wo er den Lehrstuhl der Botanik inne hatte. Endlich erhielt er 1870 den Lehrstuhl für Natural history in Edinburgh.

Sein Hauptverdienst liegt in der Erforschung der Lebensbedingungen der Tiere in der Tiefsee, wozu er durch die reichen Tiefseeausbeuten von Sars angeregt wurde. Im Sommer 1868 und 1869 führt er Tiefseeforschungen zusammen mit W. B. Carpenter auf H. M. S. „Lightning" und „Porcupine" aus. Die Resultate dieser Fahrten wurden veröffentlicht in „The depths of the Sea" 1873. Sie waren so bemerkenswert, besonders für Hydrographie sowie auch für Zoologie, daß die Regierung für eine länger ausgedehnte Forschungsreise H. M. S. „Challenger" Ende 1872 zur Verfügung stellte. Der Führer dieser 3½ Jahre dauernden Expedition wurde Thomson. Ein Stab der bekanntesten Naturforscher seiner Zeit begleiteten ihn, und so wurde ein Unternehmen ins Werk gesetzt, das in den großartigen „Reports of Challenger" seinen Niederschlag gefunden hat. Thomson selbst, der nie sehr kräftig war, überlebte die von ihm in mustergültiger Weise geleitete Expedition nicht sehr lange. Im Jahre 1877 veröffentlichte er noch zwei Bände als eine Uebersicht der reichen Resultate der Expedition, betitelt „The voyage of the Challenger in the Atlantic". Hauptsächlich war er in den letzten Jahren seines Lebens mit den Administrationen und der Ueberführung des Materials an die einschlägigen Fachgelehrten beschäftigt, ebenso mit der Redaktion der Monographien.

Seine eigenen sehr zahlreichen zoologischen Arbeiten betreffen hauptsächlich die Echinodermen.

Nach seinem Tode übernahm John Murray, der ebenfalls an der Expedition teilgenommen hatte, die Herausgabe der Challengerbände, die nach 13 Jahren erst fertiggestellt werden konnten.

Literatur. *Proceed. of the Linnean Soc. 1881 bis 1882.* — ***Thomson und Murray,*** *Reports of the Voyage of H. M. S. „Challenger". Edinburgh 1885.*

W. Harms.

Thomson
Sir William (Lord Kelvin).

Geboren am 26. Juni 1824 in Belfast, gestorben am 17. Dezember 1907 auf seinem Landsitz Netherhall bei Largs in Schottland. Sein Vater war Lehrer der Mathematik in Belfast, siedelte aber 1832 als Professor nach Glasgow über, wo William Thomson seine Vorbildung unter väterlicher Anleitung erhielt. 1841 ging er als Student nach Cambridge, darauf nach Paris, und wurde 1846, erst zweiundzwanzigjährig, Professor der theoretischen Physik in Glasgow, und blieb in dieser Stellung bis 1899, wo er die Lehrtätigkeit niederlegte. 1866 wurde er zum Sir, 1892 zum Peer mit dem Titel Lord Kelvin ernannt. So einfach der Lebensgang William Thomsons äußerlich verlaufen ist, so reich war er an Erfolgen auf den Gebieten der Physik und Technik, in die dieser Gelehrte ein halbes Jahrhundert lang bahnbrechend und fördernd eingegriffen hat. Aus der großen Zahl seiner Untersuchungen können nur einige wenige hier herausgegriffen werden. Ein Lieblingsgebiet war ihm die mechanische Wärmetheorie; im Wettkampf mit Clausius entwickelte er, auf Grund der Schriften von R. Mayer und Joule über das mechanische Wärmeäquivalent und der Carnotschen Ueberlegungen, die Gedanken, die in der exakten Formulierung des zweiten Hauptsatzes, 1851, ihren Abschluß fanden. Einer 1854 mit Joule unternommenen Untersuchung über die innere Arbeit der Gase, den Joule-Kelvinschen Satz über die Unabhängigkeit der Energie idealer Gase von der Temperatur enthaltend, folgte die Definition der absoluten Temperatur und unmittelbar daran anschließend eine Arbeit über Thermoelektrizität und die Entdeckung des Thomsoneffekts, 1854. Seine Untersuchungen über die Entladung von Kondensatoren beider Typen 1853 und über oszillierende Kondensatorentladungen 1855 sind für die Theorie der Elektrizität von besonderer Wichtigkeit. Seine Vielseitigkeit und außergewöhnliche Arbeitskraft ließ ihn in die verschiedensten Gebiete forschend eingreifen. 1849 erschienen grundlegende Untersuchungen über Hydrodynamik, 1850 eine Theorie des Kristallmagnetismus. Die Wellentheorie hat Thomsons Interesse dauernd gefesselt, 1886 veröffentlichte er eine Theorie stehender Wellen auf fließendem Wasser, ebenso war die Atomtheorie ihm ein Lieblingsgebiet. 1867 gab er eine Wirbeltheorie der Materie, 1889 eine Aethertheorie, die in hohem Grad anregend wirkte. Der Technik widmete Thomson weitgehendes Interesse, so hat er sich um den Ausbau der Kabeltelegraphie verdient gemacht und eine Theorie der Gezeiten gegeben, 1875. Ebenso dienen einige der von ihm ersonnenen Apparate in erster Linie technischen Zwecken, wie der kompensierte Schiffskompaß 1868 und die Lotmaschine für Tiefsee 1872. Von seinen physikalischen Apparaten sei in erster Linie erwähnt das 1855 konstruierte Quadrantelektrometer, 1867 ergänzt durch den Replenisher, und das Schutzringelektrometer.

Literatur. ***W. Voigt,*** *Lord Kelvin. Gött. Nachr., 1908, S. 85. Nachruf von W. Wien. Ann. d. Phys., 25, 1, 1908. Nachruf von E. Warburg. Deutsch. Phys. Gesellsch., 12, S. 911, 1910.* — ***O. Chwolson,*** *Lord Kelvin. J. d. russ. phys.-*

chem. Ges., 40, *Phys. T. S. 125, 1908.* — ***S. P. Thompson****, Life of Lord Kelvin. London 1910.* — ***O. Lodge****, Lord Kelvin. Nat.* 78, *p. 408, 1908.* — ***J. Larmor****, Lord Kelvin. Proc. Roy. Soc. A.*, 81, *Appendix p. 1. London 1908.*

E. Drude.

Thomson
Thomas.

Geboren am 12. April 1773 zu Crieff, England, gestorben am 2. Juli 1852 in Kilmun (Schottland) war Thomson, nachdem er bis zum Jahre 1818 Vorlesungen in Edinburgh und in London gehalten hatte, als der erste Chemiker Englands, der ein kleines Unterrichtslaboratorium gründete, bestrebt, Schüler heranzuziehen und in die praktische Chemie einzuführen. In Glasgow war er vom Jahre 1818 bis 1841 Professor regius der Chemie. Durch seine Lehr- und literarische Tätigkeit hat er auf seine Zeitgenossen großen Einfluß geübt. Sein System of chemistry, die Elements of chemistry, sowie sein Werk History of chemistry, dem sich Monographien über Fourcroy, Cavendish, Priestley, Scheele anschlossen, sind besonders zu nennen. Er war der erste, der Daltons Atomlehre in ihren Grundzügen mitteilte und dadurch seine Zeitgenossen auf diese Anschauungen vorbereitete. Auch durch seine Experimentaluntersuchungen, die meist der anorganischen Chemie angehörten und die in den von ihm gegründeten Annals of Philosophy, auch in Nicholsons Journal erschienen, hat er sich einen guten Namen gemacht, wenn er auch geneigt war, durch theoretische Meinungen sich beeinflussen zu lassen, wie sich bei der Feststellung der relativen Atomgewichte gezeigt hat.

E. von Meyer.

Thuret
Gustave Adolphe.

Geboren am 23. Mai 1817 zu Paris. Er studierte die Rechte und wurde mehr zufällig zu botanischen Studien getrieben, in denen ihn Decaisne 1839 unterwies. Seitdem suchte er seine Kenntnisse eifrig zu vervollständigen, so 1840 als Attaché der französischen Gesandtschaft in Konstantinopel, von wo aus er Syrien und Aegypten bereiste. Von dort kehrte er erkrankt 1841 nach Frankreich zurück, wo er sich als Privatmann dem Studium der Algen, besonders derjenigen des Meeres, widmete. Er unternahm zu diesem Zweck von seinem Wohnsitz Reutilly alljährliche Reisen ans Meer. 1851 siedelte er nach Cherbourg und später nach Antibes an der südfranzösischen Mittelmeerküste über, wo er große Sammlungen anlegte und einen botanischen Garten gründete. Dort, in Nizza, starb er am 10. Mai 1875. Er hat eine Reihe sehr wertvoller Arbeiten über die Entwickelung und Fortpflanzung der Algen, besonders der Fucaceen, Florideen und Spaltalgen, zum Teil gemeinsam mit E. Bornet veröffentlicht.

Dieser gab auch 1878 Thurets „Études Phycologiques" heraus, ein Werk, das auf 50 Foliotafeln Analysen von Meeresalgen darstellt.

Literatur. *L. Kny in „Flora", Band* 33, *1875. S. 353 bis 358.*

W. Ruhland.

Tiefseefauna.

1. Umfang des Gebietes der Tiefsee. 2. Allgemeiner Charakter des Tiefseegebietes. a) Wasserbewegung. b) Druckverhältnisse. c) Chemische Beschaffenheit des Tiefseewassers. d) Temperaturverhältnisse. e) Lichtverhältnisse. f) Bodenbeschaffenheit. 3. Die Zusammensetzung der Tiefseefauna. a) Historisches zu ihrer Erforschung. b) Methoden zu ihrer Erforschung. c) Ihre Bestandteile. 4. Die allgemeinen Existenzbedingungen der Tiefseetiere. a) Wirkungen des hohen Wasserdrucks. b) Wirkungen der chemischen Beschaffenheit des Tiefseewassers. c) Wirkungen der Temperaturverhältnisse. d) Wirkungen des Lichtmangels. α) Leuchtvermögen und Leuchtorgane der Tiefseeorganismen. β) Die Augen der Tiefseetiere. γ) Verstärkte Ausbildung von Tastapparaten. δ) Färbung der Tiefseetiere. e) Die Nahrung der Tiefseetiere. 5. Die Verbreitung der Tiefseetiere. a) Grundfauna und pelagische Fauna. b) Vertikal- und Horizontalverbreitung. 6. Die Herkunft der Tiefseetiere.

1. Umfang des Gebietes der Tiefsee. Die Tiefseegebiete nehmen den weitaus größten Raum der Ozeanbecken ein. Von den Küsten aus senkt sich der Boden seewärts zunächst nur langsam bis zu 200 und 300 m Tiefe unter Bildung einer Flachwasserzone, der sogenannten Kontinentalstufe, fällt aber dann sehr schnell in größere Tiefen ab. Und alles Gebiet von etwa 400 m Tiefe an bis zu den tiefsten Senkungen gehört dem Bereich der Tiefsee an — ein gewaltiger Komplex bei der durchschnittlichen Ozeantiefe von etwa 4000 m und bei größten Tiefen von über 8000 und 9000 m. Einige der tiefsten Stellen seien angeführt: östlich von Japan 8513 m, in der Nähe der Tongainseln 9184 m, bei den Kermadecinseln 9427 m, nördlich von den Karolinen 9644 m.

2. Allgemeiner Charakter des Tiefseegebietes. 2a) Wasserbewegung. Wellen und Meeresströmungen setzen nur die obersten Wasserschichten in Bewegung. In 1000 m Tiefe ist selbst der Golfstrom kaum noch zu bemerken und weiter hinab hören alle derartigen Wasserbewegungen vollständig auf. Trotzdem sind aber die Tiefseewasser keineswegs ganz ohne Bewegung, sehr langsame Ströme von bestimmter Ordnung und Richtung verschieben ihre Massen. Ihren Ausgang

nimmt diese Bewegung von den Oberflächenströmungen, die unter dem Einfluß der Passatwinde gewaltige Wassermengen von dem Aequator fort nach höheren Breiten führen, ohne daß entsprechend starke Oberflächenströme nach dem Aequator hin sich bewegten und so den Wasserverlust deckten. Diese Verlustdeckung muß also von anderer Seite herkommen, und zwar kommt sie aus der Tiefe. Das in höheren Breiten sich ansammelnde Warmwasser muß nämlich hier in die Tiefe sinken, da es durch die unausbleibliche Abkühlung sowie durch den erhöhten Salzreichtum, wie ihn die Verdunstung mit sich bringt, geschwerer wird. Und dies ist dann der weitere Anstoß für einen regelrechten Kreislauf. Die werden. Das Wasser selbst freilich wird bei seiner überaus geringen Kompressionsfähigkeit nur wenig davon berührt. In 1524 m Tiefe wird es unter einem Druck von 159 Atmosphären nur um $^1/_{144}$ an Volumen abnehmen.

2c) Chemische Beschaffenheit des Tiefseewassers. Während der Salzgehalt an der Oberfläche sehr bedeutend nach geographischer Lage, Jahreszeit, Winden usw. wechselt, scheint derselbe im allgemeinen in größeren Tiefen mehr gleichmäßig zu sein. Der Sauerstoffgehalt ist in der Tiefe geringer als an der Oberfläche, dagegen steigt der Gehalt an absorbierter Kohlensäure. Damit hängt die Armut der Tiefseegebiete an Kalk

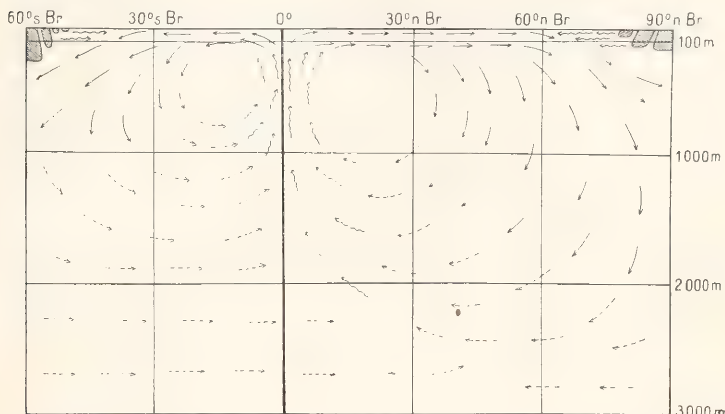


Fig. 1. Schema des Kreislaufs der ozeanischen Gewässer. Nach G. Schott 1902. Grad ausgezogene Pfeile bedeuten Warmwasser, gewellte Pfeile aufsteigende Kaltwasser, gestrichelte Pfeile die horizontalen Tiefenströme.

vom Aequator abströmenden Warmwasser sinken in mittleren Breiten bis zu 1000 und 2000 m Tiefe hinab, bewegen sich dann horizontal als Tiefenstrom wieder zum Aequator hin und steigen endlich als Ersatzwasser hier wieder an die Oberfläche, sich dabei allmählich wieder erwärmend (vgl. Fig. 1). Die Bewegung dieser Tiefenströme ist eine überaus langsame, man hat ihre Geschwindigkeit mit 60 m pro Tag berechnet.

2b) Druckverhältnisse. Der Wasserdruck ist in größeren Tiefen ein ganz enormer, da sich der in 10 m Tiefe herrschende Druck von 1 kg auf den Quadratzentimeter sich in 4000 m Tiefe auf 400 kg erhöhen muß. Die Wirkung dieses Druckes ist eine so gewaltige, daß in die Tiefe versenkte Instrumente häufig stark beschädigt, hölzerne Gegenstände auf die Hälfte ihres Volumens zusammengepreßt zusammen, da dieser unter dem hohen Druck von der Kohlensäure leicht gelöst wird.

2d) Temperaturverhältnisse. Während an der Meeresoberfläche sehr große Gegensätze der Temperatur herrschen, so daß dieselbe am Aequator bis zu +32° C ansteigen, in den Polarmeeren bis zu —3° C fallen kann, schwinden diese Gegensätze in größeren Meerestiefen vollständig. Die oberflächlichen Temperaturverhältnisse reichen im allgemeinen ziemlich unverändert nur bis in 50 m Tiefe, machen sich wohl auch noch in 100 m Tiefe etwas bemerkbar, werden aber dann völlig verwischt. Es beginnt von hier an die Temperatur ganz allmählich abzunehmen, so daß am Aequator herrschen:

in 150 m Tiefe +14° bis 17° C
in 400 m Tiefe + 8° bis 10° C

in 1000 m Tiefe + 4,5° bis 6,5° C
in 1500 m Tiefe + 3° bis 4° C
in 2000 m Tiefe + 2,5° bis 3° C
und tiefer ebenso.

Die geringsten Gegensätze zwischen Oberfläche und Tiefe finden sich natürlich in den Polargebieten, wo häufig die Oberflächenwasser infolge des schmelzenden Eises sogar kälter sind als die Tiefenwasser. Die tiefen Ozeanbecken selbst aber weisen über ihre gesamte ungeheure Ausdehnung hin nur ganz geringe Temperaturgegensätze auf, sie sind fast überall erfüllt von eisigkaltem Wasser nahe dem Gefrierpunkte. Eine Ausnahme machen nur einige wenige, von dem Hauptgebiete abgeschlossene Becken. So zunächst das Mittelmeer, in welchem konstant von 1000 bis 4000 m Tiefe eine Temperatur von etwas über +13° C herrscht, entsprechend der mittleren niedersten Wintertemperatur des mittelländischen Oberflächenwassers. Die Ursache dieses auffallenden Verhaltens ist darin zu suchen, daß das Mittelmeer an der Meerenge von Gibraltar durch eine unterirdische Schwelle, die bis zu 82 m Wassertiefe an die Oberfläche heraufragt, von den Ozeanbecken derart abgeschlossen wird, daß nur eine Mischung der oberflächlichen Warmwasser möglich ist, die kalten Tiefenwasser aber abgesperrt bleiben. Andere derartige Becken werden dargestellt durch das Rote Meer, wo die Oberflächentemperatur von 23° C bis in 300 m Tiefe reicht und wo noch in der größten Tiefe von 2190 m eine Temperatur von +21° C zu finden ist, weiter durch die Sulusee nördlich von Borneo, wo unterseeische Riffe den Zufluß des kalten Grundwassers verhindern und wo deshalb bei einer Oberflächentemperatur von +28° C in den Tiefen von 730 bis 4660 m eine konstante Temperatur von +10,3° C herrscht.

2e) Lichtverhältnisse. Eine ganz allgemein verbreitete Eigentümlichkeit der Tiefseegebiete besteht in dem Mangel an Licht. Spuren des Sonnenlichtes vermögen das Wasser im allgemeinen nur bis zu 400 m Tiefe zu durchdringen, und dies ist im besonderen die Veranlassung gewesen, weshalb man gerade in dieser Tiefe die obere Grenze des Tiefseegebietes festgesetzt hat. Durch versenkte und in der Tiefe exponierte photographische Platten hat man wohl in besonders günstigen Fällen großer Wasserhelligkeit noch eine Einwirkung von Lichtstrahlen in über 400 m Tiefe nachgewiesen, doch sind dies nur Ausnahmen. Und unter 600 m Tiefe reicht wohl sicher niemals ein Sonnenstrahl. Dabei werden die roten Lichtstrahlen vom Wasser viel stärker und schneller absorbiert als die blauen, es herrscht daher schon in 30 m Tiefe ein bläuliches Licht vor, das nach der Tiefe hin immer schwächer wird. Größere Tiefen zeichnen sich durch vollkommene Dunkelheit aus oder wenigstens durch vollkommenen Mangel an Sonnenlicht; wir werden später (vgl. Abschnitt 4 d *a*) sehen, daß dafür andere Lichtquellen begrenzten Umfangs der Tiefsee zur Verfügung stehen.

2f) Bodenbeschaffenheit. Eine ganz besondere Beachtung verdient endlich noch die Beschaffenheit der Bodenfläche, über welcher die gesamten gewaltigen Wassermassen des Tiefseeraumes gelagert sind. Im allgemeinen wird der Boden der Ozeanbecken von einem Niederschlag bedeckt, der aus sehr verschiedenartigen Resten mineralischer, tierischer und pflanzlicher Natur besteht. Die mineralischen Bestandteile entstammen zum Teil direkt der festen Erdkruste, sind als solche durch mechanische Zerstörungsprozesse von derselben abgetrennt worden und zerfallen in kontinentale und vulkanische Gesteine. Erstere bauen sich vorzugsweise aus Massengesteinen und kristallinischen Schiefern oder aus Sedimenten auf, man findet sie namentlich als Quarze und Feldspate in küstennahen Ablagerungen, wogegen sie weiter hinaus stetig an Menge und Größe der Fragmente abnehmen. Es treten hier an ihre Stelle zerkleinerte und zersetzte vulkanische Gesteine, herrührend von submarinen Ausbrüchen, schwimmenden Bimssteinen, feinsten Aschen und Staub. Daneben finden sich dann endlich noch andersartige mineralische Substanzen, die sich an Ort und Stelle auf dem Meeresboden durch chemische Prozesse neu bilden, im besonderen durch Zersetzung von Silikaten, wodurch vor allem die tonigen Zersetzungsprodukte der Aluminiumsilikate und Glaukonite entstehen.

Die organischen Bestandteile setzen sich aus Hartgebilden von Pflanzen und Tieren zusammen. Die Organismen vermögen die im Wasser gelösten Stoffe, wie Kalk, Kieselsäure, Magnesium, teilweise in sich aufzunehmen und zum Aufbau äußerer Schalen wie innerer Skelette zu verwenden. Nach dem Tode der Organismen sinken diese Hartbestandteile zu Boden und nehmen nun wichtigen Anteil an der Bildung sehr charakteristischer Niederschläge. In Küstennähe sind es von Pflanzen namentlich sessile Kalkalgen aus der Gruppe der Florideen, von Tieren besonders Korallen, Mollusken und Echinodermen, welche derartige Stoffe liefern. Für die freien Ozeane kommen nur Planktonorganismen in Betracht, und zwar von Pflanzen zunächst die Diatomeen, die in ungeheuren Mengen die Oberflächenwasser erfüllen, und dann die Coccolithophoriden, eine zu den Chrysomonadinen gehörige Algenfamilie. Diese Algen (ihr wichtigster Vertreter ist Pontosphaera huxleyi) enthalten in ihrem Protoplasmaleib kleine, aus kohlensaurem Kalk bestehende Plättchen, die sogenannten

Coccolithen. Und diese Coccolithen treten nun fast in allen Ablagerungen auf, bilden aber zuweilen bis zu dreiviertel der als Globigerinenschlamm bezeichneten Sedimente. Man hat berechnet, daß unter einem Quadratmeter Meeresoberfläche etwa 500 Millionen Coccolithophoriden leben (gerechnet die Wassermasse von der Oberfläche bis zu der noch eben belichteten Tiefe), und daß von diesen pro Tag etwa ein Drittel abstirbt, was dann für ein Jahr insgesamt 60000 Millionen tote Algen unter einem Quadratmeter Meeresoberfläche ergibt. Diese Massen würden etwa 1000 Jahre brauchen, um eine Sedimentschicht von nur 1 mm Dicke zu liefern, die rein aus Coccolithen bestände. Für den Transport in die Tiefe ist einmal ein langsames Hinabsinken der isolierten Kalkplättchen anzunehmen, dann aber auch noch ein beschleunigter Transport in den kompakteren und daher schneller sinkenden Kotballen der von diesen Algen lebenden Tiere, vor allem der Pteropoden und der pelagischen Tunicaten. — Die Artenzahl der tierischen Planktonorganismen, welche an dem Aufbau der Tiefseesedimente in großem Maßstabe beteiligt sind, ist nur eine geringe, es handelt sich im wesentlichen um Radiolarien, Foraminiferen (besonders Globigerinen) und Pteropoden. Dazu treten dann vereinzelt auch noch Bodentiere, vor allem Kieselschwämme und Echinodermen.

Je nach der Mischung der soeben aufgezählten Bestandteile hat man nun eine Anzahl verschiedener Bodenarten besonders unterschieden:

I. Gröbere Sedimente von litoralem Habitus, bestehend aus Trümmern von Gesteinen und tierischen Schalen- wie Skelettresten der mannigfachsten Art.

II. Detritogene Ablagerungen, wie sie sich hauptsächlich in der Nachbarschaft von Koralleninseln finden. Sie bestehen vorzugsweise aus Resten von Kalkalgen, Foraminiferen, Korallen, Mollusken, Bryozoen, Anneliden.

III. Vulkanische Sedimente, wie sie sich namentlich in der Nachbarschaft vulkanischer Küsten und Inseln bilden. Sie setzen sich aus Zertrümmerungsprodukten jungvulkanischer Gesteine zusammen.

IV. Glaukonitische Sedimente. Grünsande und Grünschlicke, die neben tierischen Hartgebilden einen besonders hohen Reichtum an Glaukonitkörnern und glaukonitischen Steinkernen (Eisenoxydulsilikatbildungen) zeigen. Sie finden sich besonders in der Nähe von Küsten, wo steile, aus Urgebirgsgesteinen bestehende Berge nahe ans Meer treten.

V. Blauer Schlick. Derselbe stellt feinkörnige bis schlammige terrigene Ablagerungen von überwiegend dunkelgraublauer Farbe und schmierig-weicher Beschaffenheit dar. Er findet sich an den Rändern der Festländer von 200 bis 5000 m Tiefe und enthält neben tierischen Resten vor allem anorganische Bestandteile in Form gröberer und feinster Mineralkörner und Gesteinsbrocken sowie fein verteilter Tonsubstanzen.

VI. Pteropodenschlamm. Er stellt eine Seichtwasserfacies der nächstfolgenden Bodenart dar. Am auffallendsten ist bei ihm sein Reichtum an Pteropoden- und Heteropodenschalen, daneben treten massenhaft Foraminiferenschalen und sonstige tierische Reste auf. Sedimente dieser Art treten durchschnittlich oberhalb der 2000 m-Linie auf, sie fehlen gänzlich in den kälteren Meeren, wo die Pteropoden an Artenzahl sehr zurücktreten.

VII. Globigerinenschlamm. Derselbe besitzt eine ganz außerordentlich weite Verbreitung in durchschnittlichen Tiefen von über 3000 m und reicht bis über 5500 m hinab, wo er dann von den roten Tonen abgelöst wird. In seinem Aussehen ähnelt er der Schreibkreide oder Kalkmergeln. Zumeist überwiegen in seiner Zusammensetzung die Schalen der Foraminiferengattung Globigerina sowie einiger anderen Foraminiferen (vgl. Fig. 2), zuweilen können aber auch Coccolithen vorherrschend sein. Auch andere kalkige Organismen können hie und da eine gewisse Rolle spielen, so vor allem die Seeigel mit ihren Kalkstacheln. Dagegen treten Kieselskelette durchaus zurück.

VIII. Diatomeenschlamm. Bei ihm handelt es sich um küstenferne Tiefseeablagerungen, die besonders reich an Diatomeenpanzern sind und sich hauptsächlich in größeren Tiefen der Antarctis (von etwa 2000 m an) finden. Er besteht aus organischen Kieselresten, neben Diatomeen noch aus Radiolarien und vereinzelten Schwammnadeln. Nur zuweilen sind kalkige Foraminiferenschalen beigemischt.

IX. Radiolarienschlamm. Eine an Radiolarienskeletten reiche Sonderform der nächstfolgenden Bodenart. Die Grundsubstanz ist in beiden dieselbe, ein durch Eisenoxyd und viele andere Substanzen verunreinigter Ton. Er tritt nur in großen landfernen Tiefen auf.

X. Roter Tiefseeton. Er findet sich nur in den größten Tiefen von über 4000 m an, in typischster Entwickelung inmitten des Stillen Ozeans. Seine Farbe ist meist ein helleres oder dunkleres Braun, herrührend von beigemischtem Eisenoxyd und Mangan, seine Bildung hängt zusammen mit der Zersetzung tonerdehaltiger Silikate und Gesteine, die durch Vulkanausbrüche über den Boden der Tiefsee ausgebreitet werden. Auffallend groß ist zuweilen der Gehalt an Mineralkörnern, meist solchen vulkanischen Ursprungs. Daneben sind spärlich beigemischt Schwammnadeln, Radiolarien- und Diatomeenskelette,

sowie zuweilen Foraminiferenschalen. Die Spärlichkeit dieser Elemente erklärt sich daraus, daß die zarten Skeletteile in den großen Tiefen wieder eine vollständige Auflösung erfahren. Nur widerstandsfähige Hartgebilde können sich hier dauernd erhalten, und so treten stellenweise höchst sonderbare organische Beimischungen auf, nämlich Massen von Haifischzähnen, Knochefischgehörsteinen und Walfischfelsenbeinen.

An dieser Stelle sei endlich noch des sogenannten Urschleims oder Bathybius Haeckelii gedacht, der eine Zeitlang in der Wissenschaft eine große Rolle gespielt hat. Man hielt nämlich diesen Urschleim, der 1868 von Huxley als eine aus eiweißhaltigen gelatinösen Klümpchen bestehende Substanz entdeckt wurde, für lebendes Protoplasma, für einen Organismus niederster Art, der überall den Tiefseeschlamm überziehen sollte. Nun, es stellte sich bald heraus, daß es sich um ein Kunstprodukt handelte, um Niederschlage von schwefelsaurem Kalk, die dann, wenn man Tiefseeschlamm mit Alkohol mischt, als gelatinöse flockige Massen auftreten.

3. Die Zusammensetzung der Tiefseefauna. 3a) Historisches zu ihrer Erforschung. Systematische Untersuchungen zur Erforschung der Tiefsee setzen erst mit dem Beginne des 19. Jahrhunderts ein. Als einer der ersten Erforscher dieses Gebietes ist Péron (1805) zu nennen, er kam zu dem Schlusse, daß der Boden der Ozeane mit Eis bedeckt, mithin dort alles Leben unmöglich sei. Doch wurde diese irrige Ansicht sehr bald widerlegt durch John Roß, der auf seiner großen arktischen Expedition (1818) Grundproben aus 1800 m Tiefe gewann und darin tierische Lebewesen nachweisen konnte. Im Jahre 1838 wurde der wichtige Fangapparat der Dredsche erfunden, und durch deren planmäßige Anwendung gelang es Edward Forbes, einen klareren Einblick in die Verbreitung der Meeresorganismen zu gewinnen. Immerhin mangeln auch für ihn die größeren Tiefen jegliches tierischen Lebens, stellen stille tote Räume dar. Weitere Förderung kam dann durch die großen britischen Antarktisexpeditionen unter James Clark Roß auf dem Erebus und Terror (1839 bis 1843), sowie durch die überaus verdienstlichen Arbeiten von Michael Sars und S. O. Sars, die in den fünfziger und sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts reiches Tierleben bis in 800 m Tiefe nachwiesen.

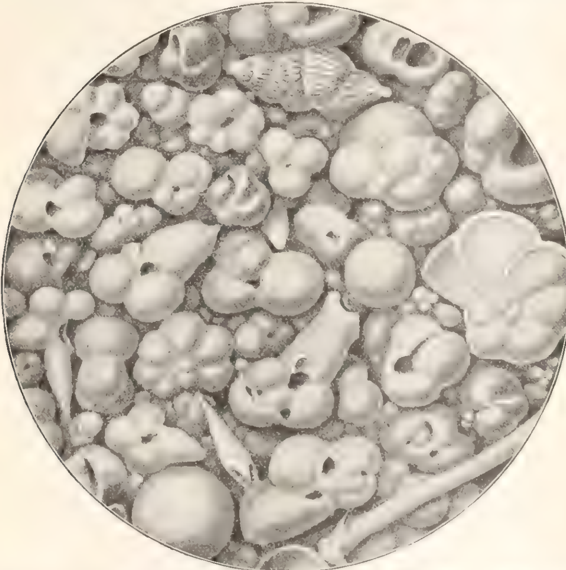


Fig. 2. Tropischer Globigerinenschlamm aus dem Indischen Ozean aus 2253 m Tiefe. Aus C. Chun 1903.



Fig. 3. Schematische Skizze einer Dredsche.

Wertvolles neues Material ergaben dann die Arbeiten, welche mit der Legung der ozeanischen Kabel verbunden waren, die Grenze tierischen Lebens wurde jetzt bis 2300 m Tiefe verschoben. Und die Fahrten der „Porcupine", welche 1869 bis 1870 die Tiefsee der atlantischen Küsten Europas und des Mittelmeers erforschten, wiesen dann Tierleben noch in 3600 m Tiefe nach. Alle diese auffälligen Ergebnisse zeitigten dann endlich den Plan zu einer großen Expedition, deren besondere Aufgabe die Erforschung der Tiefsee sein sollte, sie wurde von England aus in den Jahren 1873 bis 1876 auf dem „Challenger" unter Leitung von C. Wyville Thomson durchgeführt und befuhr hauptsächlich den Atlantischen und Stillen Ozean sowie die antarktischen Gewässer. Ihre Ergebnisse sind in einem bändereichen Werke niedergelegt und schufen die noch jetzt maßgebenden Grundlagen unseres Wissens von der Tiefsee. Von weiteren Expeditionen wären dann noch besonders anzuführen die „Blake"-fahrten unter Alex. Agassiz in den amerikanischen Gewässern, die Fahrten des Fürsten von Monaco und endlich die deutsche Tiefseeexpedition auf dem Dampfer „Valdivia" unter Leitung von C. Chun (1898 bis 1899). Letztere Expedition erforschte neben den atlantischen und antarktischen Meeren im besonderen auch den von der Challengerexpedition vernachlässigten Indischen Ozean, ihre Ergebnisse, deren Bearbeitung noch im Gange ist, werden nicht weniger bedeutungsvoll sein als die der letztgenannten englischen Expedition.

3b) Methoden zur Erforschung der Tiefseefauna. Der Fang der Tiefseeorganismen geschieht durch Netze, von denen man zwei Hauptformen unterscheidet, Grundnetze und Planktonnetze.

Die Grundnetze werden direkt bis auf den Meeresboden hinabgelassen. Ihre wichtigste Form ist die Dredsche oder das Trawl (Fig. 3). Dieselbe besteht aus einem eisernen Rahmen, an welchem der weitmaschige, aus starkem Manilahanf hergestellte Netzbeutel befestigt ist. Der eiserne Rahmen wird horizontal über den Boden hingezogen, so daß alles von ihm erfaßte sich in dem nachschleifenden Netzbeutel sammeln muß. Eine zweite Form ist die Quastendredsche, bestehend aus einem konvex gebogenen eisernen Träger, der mit Quasten aus zerfasertem Hanf besetzt ist. Sie findet Verwendung auf steinigem Boden, wo sich beim horizontalen Darüberschleifen Korallen, stachelige Krebse und ähnliches in den Quasten verfangen und so hochgezogen werden können. Zu den Grundnetzen gehören endlich noch die Tiefseereusen, die mit einem Köder versehen auf dem Meeresgrund ausgelegt werden. Es sind besonders Krebse und Fische, welche auf diese Methode erbeutet werden können.

Die Planktonnetze dienen allein zum Durchfischen der freien Wasserschichten, ohne den Grund zu berühren. Sie bestehen aus einem Rahmen und einem Netzbeutel von feinster Seidengaze und sind besonders wichtig als sogenannte Vertikalnetze (Fig. 4), dazu bestimmt, in große Tiefen hinabgelassen und dann in vertikaler Richtung wieder hoch ge-



Fig. 4. Vertikalnetz. Aus C. Chun 1903.

zogen zu werden. Ihre Oeffnung besitzt einen weiten Durchmesser, am Ende sammelt ein Glaseimer die gefangenen Organismen auf. Da die Vertikalnetze keine Entscheidung darüber zulassen, in welcher Tiefe die betreffenden Organismen gefangen wurden, so dienen zu ihrer Ergänzung noch die Schließnetze. Diese letzteren besitzen einen beweglichen Rahmen, der geöffnet und geschlossen werden kann. Geschlossen werden sie in die Tiefe versenkt, in der gewünschten Tiefe öffnet dann ein besonderer Mechanismus den Netzrahmen, es wird das Netz eine bestimmte, auf eine beliebige Länge regulierbare Strecke vertikal durch das Wasser gezogen, worauf das Netz selbsttätig sich wieder schließt und nun an die Oberfläche gebracht wird. Alles, was sich dann in dem geschlossenen Netz vorfindet, muß in der bestimmten, offen durchfischten Strecke gelebt haben.

Alle diese Netze, besonders Dredsche und Vertikalnetze, werden in sehr beträchtlichen Dimensionen verwendet, es sind daher sehr bedeutende Kräfte nötig, um diese Netze mit ihrem Inhalt aus Tiefen von einigen tausend Metern zu heben. Man benutzt dazu jetzt auf den Expeditionsschiffen besondere Dampfwinden, die Netze selbst sind an Stahlkabeln befestigt, während man früher vorzugsweise Hanfkabel gebrauchte.

3c) Die Bestandteile der Tiefseefauna. Der Anteil der einzelnen marinen Tiergruppen an der Besiedelung der Tiefseegebiete ist ein sehr verschiedener. Von Protozoen sind es Foraminiferen und Radiolarien. Erstere weisen in der Tiefsee zumeist aus Fremdkörpern des Tiefseeschlammes zusammengekittete Gehäuse auf, können zuweilen eine sehr beträchtliche Größe erreichen und bilden oft förmliche Krusten auf einer beliebigen Unterlage (Rhabdamina, Lituoliden, Astrorhiziden). Sehr mächtig entwickelt sind in der Tiefsee die Radiolarien, ihre Vertreter sind zumeist kleiner als die Oberflächenformen, ihre Kieselskelette derber und stärker (Phaeodarien, Nasselarien.)

Die meisten Schwämme gehören der Flachsee an. Tiefseeformen treten häufiger zunächst unter den Monactinelliden auf, deren Skelett aus einachsigen Kieselnadeln besteht, die eigentlichen Tiefseeschwämme aber sind die Hexactinelliden. Sie treten von etwa 180 m Tiefe an in einer überraschenden Formenmannigfaltigkeit auf, in Größen von wenigen Millimetern bis zu mehreren Metern, und reichen bis über 5000 m hinab. Einige der wichtigsten Formen sind Euplectella, Hyalonema, Pheronema, Astronema, Platylistrum, Monorhaphis, letztere Form von einer meterlangen dünnen Kieselnadel durchsetzt.

Sehr groß ist der Reichtum an Coelenteraten. Von Hydroidpolypen gehen zwar nur einige wenige in größere Tiefen hinab, so einige Plumularien, so vor allem von Tubularien ein Solitärpolyp, der Monocaulus imperator, welcher eine Länge von über 2 m erreichen kann. Größer ist der Reichtum an Hydromedusen, von denen die an den Schirmrandtentakeln mit Saugscheibchen versehenen Pectylliden zu nennen sind; weiter an Scyphomedusen, von denen besonders die durch ihre dunkelbräunlichen und violetten Farben ausgezeichneten Gattungen Atolla und Periphylla, sowie ferner Nauphanta, Leonura terminalis, Lucernaria bathyphila hervorgehoben seien. Von Siphonophoren treten in der Tiefsee die Auronecten auf, weiter Cystalia, Discalia und einige andere. Und endlich hat die Valdiviaexpedition auch Tiefseectenophoren erbeutet. — Sehr groß ist der Reichtum der Tiefsee an Anthozoen. Die Aktinien zeichnen sich durch eigenartige Um- und Rückbildungen der Tentakel aus, die Madreporiden sind zumeist sehr zerbrechlich, einige, wie die Lophohelia prolifera, bilden in der Tiefe Riffe. Von Alcyonarien sind zunächst die in der Tiefsee weit verbreiteten Gorgoniden (Chrysogorgiden, Isidinen, Callozootroon) zu nennen, die sich mit Wurzelausläufern im Schlamme festheften und vielfach durch lebhafte rote oder metallisch glänzende Farben sowie durch Phosphoreszieren ausgezeichnet sind. Letztere Eigenschaft kommt dann ferner in besonders hohem Maße den Pennatuliden zu, die in lebhaft bläulichem oder weißlichem Lichte leuchten und ebenfalls mit ihrer Achse in Schlamm oder Sand stecken (Umbellula leptocaulis, Protocaulon molle, Leptoptilum gracile, Amphianthus abyssorum u. a.).

Sehr zahlreich sind Echinodermen. Von Crinoiden treten besonders gestielte Crinoiden in großer Mannigfaltigkeit und Häufigkeit auf, nicht selten auf dem Meeresboden förmliche Wiesen bildend (Pentacrinus, Rhizocrinus, Metacrinus). Häufig sind ferner Schlangen- und Seesterne, von letzteren sind besonders charakteristische Tiefenbewohner die Pterasteriden, Archasteriden, Porcellanasteriden. Sie steigen bis in ganz gewaltige Tiefen hinab. Die leuchtende Brisinga, Hymenaster und Benthaster wurden noch in über 5000 m Tiefe erbeutet, Hyphalaster Valdiviae in fast 5000 m Tiefe. Von Seeigeln finden sich Tiefseeformen besonders unter den Spatangiden, echte Bewohner der Tiefsee sind vor allem die eigenartig gestalteten Pourtalesien (Fig. 5). Von Holothurien ist anzuführen die Ordnung der Elasipoden, ausgezeichnet durch den hochgradig bilateral symmetrischen Bau des Körpers sowie durch die langen schlauchförmigen Rückenfortsätze. Sie nähren sich wie die Tiefseeigel vom Bodenschlamm. Sehr eigenartig ist das Auftreten einer pelagischen Tiefseeholothurie, der Pelagothuria, welche

eine zwischen den Tentakeln ausgespannte Schwimmscheibe entwickelt hat.

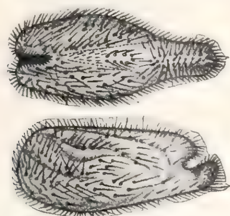


Fig. 5. Pourtalesia miranda. Ein Tiefsee-Seeigel. Nach A. Agassiz 1888.

Von Würmern leben in größeren Tiefen namentlich die röhrenbewohnenden Serpuliden und Terebelliden, weiter Gephyreen, durchsichtige Tomopteriden, Sagitten und endlich eine dem pelagischen Leben angepaßte Nemertine (Pelagonemertes).

Die Brachiopoden leben vorzugsweise in geringeren Tiefen, doch gehen einzelne Arten bis in 5500 m Tiefe hinab. Das gleiche gilt für die Bryozoen.

Von Crustaceen sind fast alle Ordnungen reich vertreten. Zwar gilt dies weniger von den niederen Krebsen, von denen eigentlich nur die Lepadiden in der Tiefsee stärker entwickelt sind. Von Copepoden ist nur eine wirkliche Tiefseeform bekannt (Pontostratiotes abyssicola), und von Ostracoden gehört hierher nur die Familie der Halocypriden mit rückgebildeten Augen und zum Teil riesiger Körpergröße (wie bei Gigantocypris). — Um so gewaltiger ist dagegen die Zahl der höheren Krebse, die zugleich auch die allermannigfachsten Anpassungen an das Leben in der Tiefsee zeigen. Von Leptocariden wäre zunächst die Nebaliopsis typica aus 2500 bis 4660 m Tiefe anzuführen, deren rudimentäre Augen des Pigments und der Sehelemente entbehren, weiter wären zu nennen die Isopoden, von denen die Mehrzahl die Augen vollständig eingebüßt hat und deren Hautpanzer mit Höckern, Dornen und Stacheln reich besetzt ist. Zahlreiche Vertreter in der Tiefsee weisen ferner die Schizopoden (Fig. 11) auf, ausgezeichnet durch ein sehr wechselndes Verhalten der Augen, die bald sehr hoch entwickelt, bald ganz rudimentär sind. Es sind gewaltige Räuber, die häufig in großen Schwärmen vereinigt auftreten. Am zahlreichsten sind aber die Dekapoden. Von Macruren verdienen in erster Linie die Eryoniden hervorgehoben zu werden, welche, wie die Gattungen Willemoesia und Polycheles, vollständig blind, als Ersatz dafür aber mit langen Scherenbeinen und Fühlern ausgestattet sind. Auch Thaumastocheles ist völlig blind, dafür aber mit sehr eigenartig geformten langen Scheren und langen dicht gestellten Tasthaaren an den Gliedmaßen versehen. Unter den Garneelen ist besonders die Gattung Nematocarcinus (Fig. 6) hervorzuheben, sie trägt außerordentlich lange dünne Antennen, die mehrfache Körperlänge erreichen können, sowie mehr als körperlange Beine. Bei Sergestiden können die Fühler gar den Körper um das zehn- bis zwanzigfache an Länge übertreffen. Von Anomuren gehen in große Tiefen sowohl die Galatheen wie die Paguriden. Erstere besitzen fast ausnahmslos stark rückgebildete Augen sowie sehr ver-

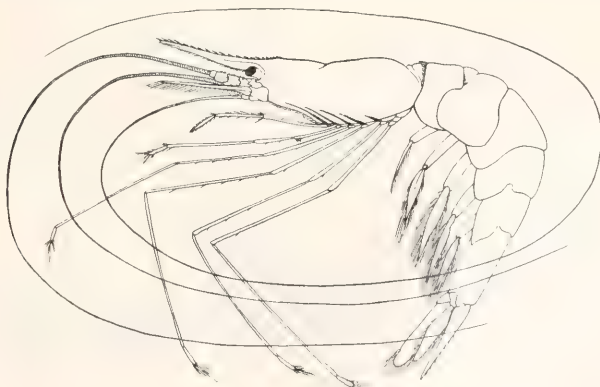


Fig. 6. Nematocarcinus ensiferus. Ein Tiefseekrebs. Nach A. Agassiz 1888.

längerte Antennen, letztere, die Einsiedlerkrebse, haben ihre biologischen Gewohnheiten auch in der Tiefsee beibehalten, sogar die Symbiose mit Aktinien (Pagurus abyssorum). Zahlreich sind endlich auch die Brachyuren (Krabben), zumeist von lebhaft roter Farbe und durch mannigfache Anpassungen ausgezeichnet. — Von Pantopoden bedarf die durch ihre enorme Größe und ihre hochrote bis gelbliche Färbung ausgezeichnete Gattung Colossendeis der besonderen Erwähnung.

Recht wenig charakteristisch für die Tiefsee sind die Mollusken. Muscheln und Schnecken sind fast ohne jede Eigenart, höchstens daß infolge der Kalkarmut der Tiefseewasser die Schalen zumeist zart und dünn sind, auch besondere Skulpturen in Form von Dornen und Zacken meist fehlen. Eine Besonderheit zeigen nur die Tiefseeschnecken insofern, als ihnen in der Mehrzahl der Fälle die Augen fehlen, auch wenn die nächsten Verwandten aus der Flachsee solche besitzen. Wirklich charakteristische Tiefseeformen haben nur die pelagisch lebenden Cephalopoden (Fig. 7) hervorgebracht, sie zeigen hochgradige Anpassungen in Teleskopaugen und Leuchtorganen.

Von Tunikaten begegnen wir in der Tiefsee einmal Ascidien, von zum Teil sehr bedeutender Größe, sowie weiter pelagischen Appendikularien. Während letztere zumeist winzig klein sind, erreicht Bathochordaeus Charon aus der Tiefsee eine Größe von $8^1/_2$ cm.

Von Wirbeltieren sind es nur die Fische, welche in der Tiefsee ihre Existenzbedingungen finden können. Die Zahl der Arten, welche unterhalb der 400 m-Linie nachgewiesen sind, beträgt mehr als tausend. Auf dem Grunde leben Vertreter der Torpediniden, Pleuronectiden, Malthaeiden, Lophiiden, Zoarciden, Macruriden, Gadiden. Pelagische Tiefenformen sind: Cyclothone, Melamphaes, Sternoptyx, Ceratiiden, Opisthoproctus (Fig. 12), Gigantura, Alepocephaliden, Astronesthiden (Fig. 8), Stomiatiden (Fig. 10), Dolichopteryx, Saccopharynx und andere. Hier treffen wir die hochgradigsten Umbildungen von Tiefseetieren an, wie sie in der Umbildung der Augen, in der Entwickelung von Leuchtorganen besonders hervortreten.

4. Die allgemeinen Existenzbedingungen der Tiefseetiere. 4a) Wirkungen des hohen Wasserdrucks. Der enorme Wasserdruck von vielen Atmosphären, wie er sich in größeren Tiefen findet, ist natürlich auf die Tiere unmittelbar nicht wirksam, da dieselben ja allseitig von demselben umgeben, von ihm erfüllt sind. Die Druckunterschiede gegenüber der Oberfläche kommen erst dann zum äußeren Ausdruck, wenn Tiefseetiere sehr schnell aus der Tiefe in die Höhe befördert werden. Der im Inneren der Körperhöhlen und Gewebe herrschende



Fig. 7. Amphitretus. Ein Tiefseetintenfisch mit Teleskopaugen. Aus C. Chun 1903.



Fig. 8. Astronesthes splendidus (Fam. Astronesthiden). Aus C. Chun 1903.

hohe Druck kann sich dann nicht genügend mit dem geringeren Druck der neuen Umgebung ausgleichen, die Folge ist ein Aufgetriebenwerden des Körpers oder gar ein Zerreißen der Gewebe. Fische kommen so häufig an die Oberfläche mit unförmlich aufgetriebenem Bauche, mit vorquellenden Augen, vorgestülptem Maul und Enddarm oder gar mit geplatzter Schwimmblase. Zarte Tiefseeorganismen, welche Gasblasen im Inneren enthalten, können völlig zerfetzt an der Oberfläche erscheinen, hartschalige Echinodermen vielfach in Stücke zerbrochen. Als eine besondere Anpassung an hohen Druck mag vielleicht der Mangel an Schuppen und die gallertweiche Hautbeschaffenheit vieler Tiefseefische anzusehen sein, da auf diese Weise Verschiedenheiten im Druck zwischen äußerem Medium und Körperinnerem sich schneller ausgleichen können und so ein leichterer Wechsel der Wasserschichten in vertikaler Richtung möglich ist. Aus den gleichen Gründen mag ferner das Zurücktreten oder Fehlen der Schwimmblase bei den meisten Tiefseefischen zu erklären sein.

4b) Wirkungen der chemischen Beschaffenheit des Tiefseewassers. Bei den geringen Abweichungen, welche das Tiefseewasser in seiner chemischen Beschaffenheit gegenüber den Oberflächengewässern zeigt, werden in diesem Zusammenhange nur wenige Umbildungen von Tiefseetieren zu verzeichnen sein. So ist es wohl der geringere Sauerstoffgehalt, der bei Tiefseekrabben eine Vergrößerung und Auftreibung der Kiemenregion hervorgerufen hat; so ist es weiter die Kalkarmut der Tiefengewässer, welche bestimmenden Einfluß auf die Stärke von Kalkskeletten und -gehäusen ausgeübt hat. Foraminiferen und Würmer können höchstens noch sehr zarte kalkarme Gehäuse errichten; Korallen, Bryozoen, Seeigel zeigen häufig eine sehr beträchtliche Reduktion ihrer Kalkskelette; Muscheln und Schnecken sind kleiner und mit dünneren Schalen ausgestattet; Tiefseefische weisen vielfach ein spongiöses Skelett auf. Im Gegensatz dazu werden Kieselskelette häufig in besonderer Stärke aufgebaut, so besonders von Tiefseeradiolarien.

4c) Wirkungen der Temperaturverhältnisse. Auch die niederen Temperaturen der Tiefsee haben kaum besondere Anpassungen hervorgerufen. Die Gegensätze zur Oberfläche werden auch hier erst wirksam, wenn die Tiere in tropischen Gewässern plötzlich an die Oberfläche gebracht werden; sie sterben sofort und verfallen gänzlicher Auflösung, falls man sie nicht sogleich in eisgekühltes Wasser bringt. Wie übrigens Oberflächenformen der warmen Zone den Kaltwassergebieten der Arktis und Antarktis sich angepaßt haben, so können umgekehrt Tiefseeformen auch unter hohen Temperaturen leben. Dafür sprechen einmal die regelmäßigen Vertikalwanderungen, die man bei zahlreichen pelagischen Formen beobachtet hat, dafür sprechen vor allem Beobachtungen, die man im Roten Meere gemacht hat. Hier, wo in Tiefen von 2000 m noch $+21^0$ C herrschen, traf man typische Tiefseebewohner an wie Hexactinelliden, Tiefseeechinodermen, Tiefseemuscheln (Cuspidaria, Pseudoneaera, Amussium, Limopsis, Verticordia), pelagische Tiefseekrebse und Tiefseefische, darunter Chauliodus Sloanii. Aehnliches gilt für das Mittelmeer. Daneben sind dann freilich andere Tiefseeformen von den kalten Temperaturen abhängiger, so beispielsweise die Tiefseekrabben, welche die warmen Tiefenwasser des Roten Meeres durchaus meiden.

4d) Wirkungen des Lichtmangels. Der Mangel an Sonnenlicht ist unter allen Besonderheiten des Tiefseegebietes der Faktor, welcher am stärksten umgestaltend auf den Organismus seiner Bewohner eingewirkt hat. Wir sahen bereits früher, daß unterhalb der 400 m-Linie so gut wie jede Spur von Tageslicht erloschen ist, es müßte also hier volle Dunkelheit herrschen, wenn keinerlei andere Lichtquellen zur Verfügung ständen. In Wirklichkeit sind solche vorhanden, sie kommen her von den Organismen selbst, von solchen, die ein ausgesprochenes Leuchtvermögen besitzen.

a) Leuchtvermögen und Leuchtorgane der Tiefseeorganismen. Ein solches Leuchtvermögen kann zunächst ganz allgemein über den Körper verbreitet sein. Es gilt dies für einzelne Protozoen und Würmer, für die bereits früher erwähnten stark phosphoreszierenden Seefedern und Rindenkorallen, für einen Seestern, die Gattung Brisinga, und andere. Indessen ist diese Leuchtfähigkeit keineswegs etwa eine ausschließlich den Tiefseetieren zukommende Eigenschaft, auch viele Oberflächenformen besitzen sie in hohem Ausbildungsgrade, man denke an die Gattung Noctiluca unter den Protozoen, an die Pyrosomen unter den Manteltieren. Etwas anderes ist es dagegen mit dem Auftreten besonderer hoch kompliziert gebauter Leuchtorgane, diese sind zum mindesten in weit überwiegendem Maße nur an Tiefseetieren anzutreffen. In drei Tiergruppen zeigen sie eine besonders mächtige Entfaltung, bei Krebsen, Cephalopoden und Fischen.

Unter den Krebsen sind es Tiefseeschizopoden, welche hoch entwickelte Leuchtorgane aufweisen. Dieselben sitzen einmal als relativ ansehnliche konische Gebilde an den Stielaugen, sind mit Pigmentmantel, Reflektor und dem sogenannten Streifenkörper, einem wohl mit der Licht-

erzeugung im Zusammenhang stehenden Gebilde, ausgestattet und lassen ihr stetig leuchtendes Licht auf die Region der Mundwerkzeuge und der Raubfüße fallen, wobei zur schärferen Beleuchtung ihre Drehbarkeit von ganz besonderem Nutzen ist. Weiter treten dann Leuchtorgane an den Seitenwandungen des Thorax und an der Bauchseite des Abdomens auf, sie sind von kugeliger Gestalt und neben den oben genannten Bestandteilen noch mit einem besonderen dioptrischen Apparat in Gestalt einer Linse ausgerüstet. Auch sind sie gleichfalls mannigfach drehbar.

Unter den Tintenfischen finden sich Leuchtorgane bei einigen Familien der Oigopsiden, bei Bathyteuthis, Thaumatolampas und manchen anderen. Nur selten sind sie über die gesamte Manteloberfläche und über die Arme gleichmäßig verbreitet, meist sind sie beschränkt auf die Baucharme, auf die Unterseite des Mantels, auf die ventrale Kopfregion, auf den Trichter, und so fort. Recht häufig finden sich ferner besondere Augenorgane auf der Ventralfläche des Augenbulbus vor, und bei Thaumatolampas diadema (Fig. 9) liegen Leuchtorgane auf der Bauchfläche des Körpers, von wo sie durch den durchsichtigen Mantel hindurch ihr Licht aussenden. Der Bau der Leuchtorgane ist im einzelnen ein sehr variabler, als wichtigste Bestandteile sind zumeist vorhanden zellig-drüsiger Leuchtkörper, Reflektor, Pigmentmantel und Linse. Entsprechend dem wechselnden Bau ist auch Intensität wie Qualität des Lichtes sehr verschieden. So leuchten beispielsweise bei Thaumatolampas diadema die mittleren Augenorgane prachtvoll marinblau, das mittlere der fünf Ventralorgane himmelblau, die beiden Analorgane rubinrot, die übrigen weiß oder perlmutterfarben.



Fig. 9. Thaumatolampas diadema. Ein Tiefseetintenfisch mit Leuchtorganen. Aus C. Chun 1903.

Von den Tiefseefischen weist etwa 1/9 aller bekannten Arten Leuchtorgane auf, sie treten auf bei Haien (Spinaciden) sowie bei vielen Knochenfischen (Stomiatiden, Sternoptychiden, Scopeliden, Ceratiiden u. a.). Viele dieser Formen sind zweifellos nicht ausschließliche Tiefseebewohner, sondern steigen nachts an die Oberfläche, so daß wohl auch das Dunkel der Dämmerungszone und der Nacht an der Bildung der Leuchtorgane mitgewirkt haben mag. Andere dagegen sind ebenso zweifellos reine Tiefenbewohner, so Spinaxarten, Centroscyllium, Stomiatiden, Cyclothone, Sternoptyx, Argyropelecus, Lampanyctus. Immer aber handelt es sich bei Leuchtfischen nur um pelagische, nie um Grundformen

Form und Anordnung der Leuchtorgane ist ganz außerordentlich verschieden. Besonders gestaltete Organe finden sich am Kopf in der Umgebung der Augen, andere sitzen an verlängerten Flossenstrahlen, an Barbeln, wieder andere treten in massenhafter Ausbildung über Rumpf und Flossen verstreut auf. Ihrem Bau nach sind alle Leuchtorgane drüsige Organe. Drüsenzellen erzeugen das Licht, dazu treten Reflektoren, Pigmenthüllen, Linsenkörper. Das Leuchten, welches von diesen Organen ausstrahlt, ist ein sehr intensives und erglänzt in den verschiedensten Farben. Um ein Beispiel anzuführen, so leuchtet bei Malacosteus ein großes halbmondförmiges, ventral vom Auge gelegenes Organ tief karminrot, ein zweites kleineres, postorbital gelegenes dagegen hellgrün.

Die biologische Bedeutung dieser Leuchtorgane ist eine sehr mannigfache. So dienen sie zunächst zum Anlocken der Beute, da ja viele Organismen von Licht intensiv angezogen werden. In dieser Hinsicht besonders wirksam werden die Leuchtorgane sein, welche an verlängerten Körperfort-

sätzen sitzen. Solche finden sich bei vielen Knochenfischen. Bei Chauliodus (Fig. 10) wird ein kleines Leuchtorgan auf dem enorm verlängerten und über den Kopf vorschlagbaren ersten Strahl der Rückenflosse getragen, so daß das Ganze wie eine Angel mit Köder wirkt. In ähnlicher Weise und zu ähnlichen Zwecken treten bei Stomiatiden Leuchtorgane am Ende langer Barbeln auf.

weise bei der Gattung Myctophum jede der 70 Arten ihre ganz bestimmte Zahl bestimmt gruppierter Leuchtorgane aufweist. Bei den Stomiatiden bilden diese Organe in ihrer Gesamtheit am Rumpfe Zeichnungen und Muster, die sich als Leuchtpunkte von meist schwarzem, aber auch silberglänzendem oder bronzefarbenem Untergrund abheben, und so durchaus mit den am Sonnenlicht durch

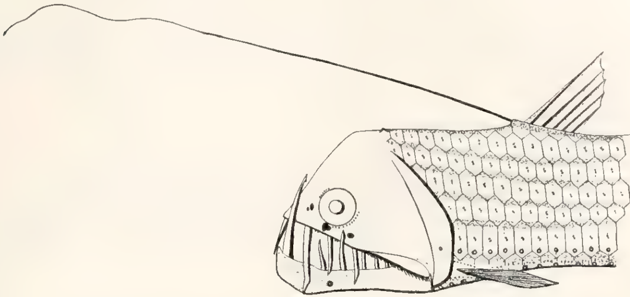


Fig. 10. Chauliodus Sloanei (Fam. Stomiatiden). Nach A. Brauer 1906.

Pigmente hervorgerufenen Zeichnungen und Färbungen vergleichen lassen. Es würden also derartige Leuchtorgane in ihrer Gesamtheit dem Erkennen der Artgenossen dienen, vielleicht auch der Geschlechtsgenossen bei sexuell dimorpher Ausbildung. Es spricht für diese Deutung der Leuchtorgane als Arterkennungsmerkmale, daß sie nur bei pelagisch umherschwärmenden Formen auftreten, also bei solchen, welche besonderer Kennzeichen zum Zusammenfinden bedürfen, nicht aber bei Grundformen. Und vieles von dem, was hier im besonderen für die Knochenfische dargelegt wurde, mag auch für die Cephalopoden Geltung haben.

Weiter dienen die Leuchtorgane zum wirklichen Sichtbarmachen von Objekten der unmittelbaren Umgebung. Diese Aufgabe muß vor allem den Augenorganen zukommen. So bei den Schizopoden, wo die drehbaren Leuchtorgane der Stielaugen so sitzen, daß ihr Schein gerade auf die Region der Mundwerkzeuge und der mächtigen Raubfüße fällt, also dahin, wo die Beute ergriffen werden muß. Aehnlich liegen die Verhältnisse bei vielen Knochenfischen. Hier treten bei Chauliodus (Fig. 10), bei Myctophiden, Stomiatiden, Anomalopiden große Leuchtorgane am Kopfe auf, die häufig wie Scheinwerfer drehbar sind und die Umgebung beim Beutesuchen hell erleuchten müssen. Dazu kommt, das alle die genannten Formen, sowohl unter den Krebsen wie unter den Fischen gewaltige Räuber sind, die mit starken Scheren oder mächtigem Gebiß ausgerüstet sind.

Eine ganz andere Bedeutung kommt dagegen den Leuchtorganen zu, welche bei den Fischen in großer Zahl über den ganzen Körper zerstreut sind. Sie finden sich vorzugsweise am Rumpfe, besonders in dessen ventralen Hälfte, aber auch am Kopfe, auf den Flossen, an der Zunge. Ihre Form, Größe, Anordnung, Lichtrichtung, ihr innerer Bau ist überaus wechselnd, dabei aber doch für die einzelnen Gattungen und selbst Arten konstant. Es kommt ihnen so ein hoher systematischer Wert zu, so daß beispiels-

β) Die Augen der Tiefseetiere. Wohl kein Organ der Tiefseetiere zeigt hochgradigere und mannigfachere Anpassungen an das Leben in der Tiefe als das Auge. Auf dieses nur für das Licht berechnete Organ mußte naturgemäß eine dunkle Umgebung von allerstärkstem Einfluß sein. Nach zwei Richtungen machten sich diese Einflüsse geltend. Einmal suchten die ursprünglichen normalen Lichtaugen möglichst alle auch noch so geringen Spuren von Licht aufzufangen und für eine Wahrnehmung nutzbar zu machen, sie nahmen unter einseitiger Spezialisierung enorme Dimensionen an; oder aber sie verzichteten völlig auf jede Lichtwahrnehmung und bildeten sich zurück.

Die zuerst genannte Anpassung setzt unbedingt voraus, daß in den Tiefen, wo sie

stattfand, noch irgendwelche Spuren von Licht vorhanden sein mußten. Diese Tiefen mögen zum Teil noch innerhalb der Dämmerungszone mit ihren schwachen Lichtspuren gelegen sein, zum Teil aber auch muß das künstlich erzeugte Licht leuchtender Organismen ausreichend gewesen sein, um eine Weiterentwickelung der Augen hervorzurufen und zu fördern.

Als erste allgemeine Anpassungserscheinung in der Richtung einer Ausnützung kleinster Lichtmengen ist eine beträchtliche Vergrößerung der Augen anzuführen. So besitzen im allgemeinen die pelagischen Tiefseeschizopoden sehr große Augen (Fig. 11), sie können hier bei einzelnen Formen, wie der Gattung Stylocheiron geradezu monströse Ausdehnung gewinnen und $^1/_{10}$ bis $^1/_6$ der Körpergröße erreichen. Auch bei anderen Krebsen, besonders Brachyuren und Macruren, können die Augen enorm vergrößert sein, das gleiche gilt für viele Fische, wo besonders große Linsen vorzügliche Lichtfänger abgeben. Mit dieser Vergrößerung der Augen gehen aber häufig noch andere Umbildungen Hand in Hand. So kommt es bei den Tiefseeschizopoden zur Scheidung der Fazettenaugen in Front- und Seitenaugen. Die letzteren sind allein dazu bestimmt, die von den oben erwähnten Leuchtorganen belichteten Regionen zu durchforschen; die Frontaugen dagegen dienen dazu, auch schwach belichtete Körper auf größere Entfernungen wahrzunehmen, wozu sie besonders befähigt sind durch die zwar nur wenigen, aber sehr langen Fazettenglieder sowie durch die Art ihrer Pigmentanordnung, worauf wir gleich noch näher zu sprechen kommen werden. Die eigenartigste Form vergrößerter Tiefseeaugen wird aber durch das Teleskopauge dargestellt. Wir begegnen ihm einmal bei Cephalopoden (Amphitretus, Vampyroteuthis), wo die Augen parallel gestellte, kegelförmige und lang ausgezogene Gebilde darstellen (vgl. Fig. 7), wir finden es dann aber in hoher Ausbildung vor allem bei Knochenfischen, hier in nicht weniger als 12 Gattungen, die 7 verschiedenen Familien angehören. Die normalen Fischaugen sind seitlich am Kopf gelagert und zwar so, daß



Fig. 11. Nematoscelis mantis. Ein Tiefseeschizopode mit großen Augen. Aus C. Chun 1903.

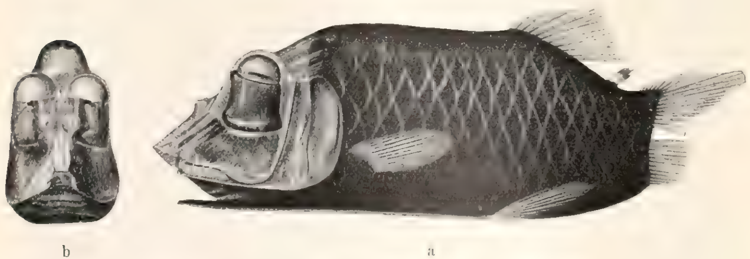


Fig. 12. Opisthoproctus soleatus. Ein Tiefseefisch mit Teleskopaugen. a von der Seite. b von vorn. Nach A. Brauer 1906.

sie seitwärts vorwärts blicken, mithin ein binokuläres Sehen unmöglich machen. Auch die meist sehr großen Teleskopaugen liegen seitlich am Kopf, aber sie sind nicht seitlich gerichtet, sondern nach der Schnauze hin oder nach oben (Fig. 12). Das Auge selbst ist röhrenförmig gestaltet, die Hauptachse (Kornea-Augengrund) ist länger als die Querachse, also umgekehrt wie beim gewöhnlichen Seitenauge. Die Linse ist sehr groß und ragt weit aus der Pupille hervor. Getrennt voneinander sind beide Augen nur durch ein schmales Interorbitalseptum, ihre Hauptachsen sind mehr oder weniger einander parallel gerichtet, so daß ein binokuläres Sehen ermöglicht wird. Die Hauptleistungen des Teleskopauges sind zu suchen in einer möglichst großen Ausnutzung der Lichtquellen, in einer schärferen Unterscheidung der Lichtintensitäten, in einer besseren Abschätzung der Entfernungen, einer besseren Wahrnehmung von Bewegungen. Als eine Besonderheit des Teleskopauges der Fische ist ferner noch die Zerlegung der Retina in eine Haupt- und Nebenretina hervorzuheben. Letztere liegt stets näher dem Pupillenrand und empfängt bei einigen Formen sogar ihr Licht direkt von außen durch ein besonderes Fenster, nicht durch die Linse hindurch. Es stellt die Nebenretina einen vorzüglichen Sucher und Signalapparat dar, welcher bereits aus der Ferne Licht wahrzunehmen vermag. Erst beim Sehen aus größerer Nähe tritt dann die Hauptretina in Tätigkeit.

Eine weitere besondere Anpassung der Augen von Tiefseetieren äußert sich in der Pigmentanordnung. Das Pigment findet sich stets in der sogenannten Dunkelstellung, d. h. es zieht sich möglichst von den lichtaufnehmenden Elementen zurück, um denselben das Auffangen aller vorhandenen Lichtstrahlen zu erleichtern. Während beispielsweise am Fazettenauge der Krebse in Tagesstellung das Pigment die Sehstäbchen vollständig einhüllt, so daß jedes Ommatidium nur die von seiner zugehörigen Kornealinse und seinem Kristallkegel aufgenommenen und damit nur die zur Ausbildung eines scharfen Bildes dienenden Lichtstrahlen empfängt, werden bei Dunkelstellung, in welcher die Sehstäbchen frei von Pigment sind, die aufgenommenen Lichtstrahlen ungehindert stets eine größere Zahl benachbarter Ommatidien treffen, es lagern sich die Einzelbilder übereinander und werden so zwar unscharf, dafür aber lichtstärker. Bei schwacher Beleuchtung des Raumes wird das in Dunkelstellung befindliche Auge also mehr sehen als das Tagauge. Demgemäß befindet sich das Augenpigment der Tiefseekrabben stets in Dunkelstellung, ja kann sogar ganz fehlen. Bei den Tiefseeschizopoden treffen wir gleichfalls stets Dunkelstellung an, und hier sind es dann besonders die riesigen Frontaugen von Nematoscelis und Stylocheiron, welche mit ihren enorm verlängerten pigmentfreien Fazettengliedern ganz außerordentlich empfindliche Sinnesapparate darstellen, die auch noch den schwächsten auffallenden Lichtstrahl sich nutzbar machen können. Es finden sich übrigens diese Frontaugen nur bei den pelagisch lebenden Formen, die zugleich sehr räuberische Gewohnheiten besitzen, also trefflicher Sinnesorgane durchaus bedürfen.

Auch bei Tiefseecephalopoden weist das Auge stets Dunkelstellung des Pigments auf, indem die Stäbchenlage frei von solchem ist. Ebenso ist bei Fischen die Dunkelstellung des Retinapigments, insofern dieses die Stäbchen völlig frei vorragen läßt, überall festzustellen; sie ist so fest fixiert, daß selbst ein längerer Aufenthalt am Licht auf sie keinen Einfluß ausübt. Daneben findet sich im Knochenfischauge noch eine zweite Anpassung an das Dunkelleben. Es fehlen nämlich ganz die Zapfen, welche nur bei Tagtieren als die farbenempfindlichen Elemente auftreten, es sind also nur, ganz wie bei Nachttieren, die rein lichtempfindlichen Stäbchen vorhanden.

Die gegenteilige Reaktion auf das Leben im Dunkeln besteht in starkem Zurücktreten oder gänzlichem Schwinden der Sehorgane, wenn dies auch gegenüber den hochgradigen Anpassungen eine viel seltenere Erscheinung ist. Früher schon wurde erwähnt, daß Tiefseeschnecken augenlos sind, blinden Formen begegnen wir dann weiter vor allem bei Krebsen und Fischen. Um zunächst von ersteren zu sprechen, so sind vollständig blind die Eryoniden, bei denen sogar die Augenstiele zur Rückbildung gelangt sind, und die Halocypriden, während bei vielen Amphipoden wenigstens eine weitgehende Rückbildung eingetreten ist. Vollständig blind ist ferner Ethusa granulata in größeren Tiefen, bei Tiefseekrabben finden sich alle Stufen der Rückbildung, sie kann sich nur auf das fehlende Pigment erstrecken, sie kann so weit vorschreiten, daß der Augenstiel höchstens noch Tastempfindungen aufzunehmen vermag. Von Tiefseefischen sind es nur auf dem Grunde lebende Formen, welche blind sind. So ein auf Sandboden sich aufhaltender Rochen, Benthobatis, dessen Augen nur noch als ganz kleine Fensterchen in der pigmentierten Haut hervortreten und der Linse, der Iris, des Pigments entbehren; so zwei Gattungen von Knochenfischen, Aphyonus und Barathronus (Fig. 13). Bei letzterer Form ist äußerlich vom Auge gar nichts mehr zu erkennen, es liegt als sehr stark rudimentäres Gebilde ganz in der Tiefe der Haut.

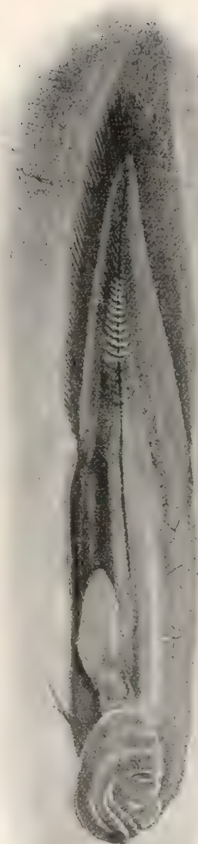


Fig. 13. Barathronus bicolor, ein blinder Tiefseefisch. Aus C. Chun 1903.

γ) Verstärkte Ausbildung von Tastapparaten. Bei der trotz vielfach hoher Ausbildung immerhin beschränkten Rolle, welche die Augen beim Erkennen der Umgebung spielen, ist es erklärlich, daß daneben Tastapparate sich in hoher Ausbildung entwickelten. So sind bei Ringelwürmern die Fühler sehr lang entwickelt, so begegnen wir unter den Krebsen Formen mit ganz extrem langen Fühlern und Beinen, wie es oben Figur 6 in einem charakteristischen Falle zeigt, wie es aber noch übertroffen wird von der Gattung Aristaeopsis, wo Exemplare bei 28 cm Körperlänge Antennen von nahezu $1\frac{1}{2}$ m Länge entwickeln können. In gleicher Anpassungsrichtung finden wir bei Fischen Flossenstrahlen und Barbeln von bedeutender Größe (Fig. 8, 10).

δ) Färbung der Tiefseetiere. Im allgemeinen herrschen rote (Polypen, Echinodermen, Krebse) und schwarze (Fische) Farben vor, oder aber die Farbe ist ganz geschwunden und es treten bleiche oder farblose Formen auf (Würmer Krebse, Cephalopoden, Fische). Doch sind auch lebhaftere Farben (abgesehen natürlich hier von Leuchtfarben) mannigfacher Art nachgewiesen, so beispielsweise bei Fischen.

4e) Die Nahrung der Tiefseetiere. Die „Urnahrung" aller Meerestiere bilden in letzter Instanz die pflanzlichen Organismen des Meeres, welche vermöge der Assimilation anorganische Substanzen in organische umzuwandeln vermögen. Dieser Vorgang findet bekanntlich nur unter dem Einfluß des Lichtes statt und zwar besonders der roten und gelben Strahlen, wenigstens soweit es die grünen Pflanzen angeht. Wir erfuhren aber früher, daß gerade diese Strahlen schon in sehr geringen Tiefen vollständig absorbiert werden, es müssen also die Existenzbedingungen für die grünen Pflanzen schon sehr bald schwinden. Und in der Tat staut sich die große Masse des pflanzlichen Planktons in 40 bis 80 m Tiefe an und nur verhältnismäßig wenige Formen gehen tiefer hinab und bilden hier die sogenannte Schattenflora. Von grünen Formen gehört dieser Schattenflora namentlich die Gattung Halosphaera an, weiter sind es aber besonders braune und rote Algen, welche bis zu 360 m Tiefe gehen, da sie in erster Linie die sehr viel tiefer vordringenden blauen Strahlen bei der Assimilation verwenden. Unter 400 m treten aber außer Bakterien keinerlei pflanzliche Organismen auf, es fehlt also hier die Quelle stetig neuer Nahrungsproduktion.

Und doch begegnet man unterhalb dieser Tiefen noch einer überaus reichen, auf Pflanzennahrung angewiesenen Fauna. Woher stammt ihre Nahrung? Nun, die Zufuhr erfolgt von außen, von der Oberfläche des Meeres her. Die toten Körper der Planktonorganismen sinken und rieseln, wie übrigens schon oben (2f) erörtert wurde, wie ein beständiger gleichmäßiger Regen in die Tiefen, dabei sich langsam zersetzend. Sie bilden die Ausgangsnahrung der Tiefseetiere. Von ihnen ernähren sich die Protozoen der Tiefsee, die Schwämme, Medusen, die niederen Krebsformen der Copepoden und Ostracoden, die Mollusken, Appendikularien und zahl-

reiche Grundformen. Letztere treten vor allem als Schlammfresser auf, man findet ihren Darm häufig ganz von Schlamm erfüllt, dem auf diese Weise die in ihm enthaltenen organischen Reste der sich zersetzenden Oberflächenformen entzogen werden (Würmer, Echinodermen, Krebse, Fische). Und alle diese bilden ihrerseits dann wieder die Nahrung der Fleischfresser, wie sie besonders hoch entwickelt unter den höheren Krebsen, Cephalopoden und Fischen auftreten. Namentlich die letzteren erweisen sich als ganz gewaltige Räuber und sind als solche mit trefflichen Bewegungs- und Sinnesorganen ausgestattet, besitzen ferner häufig ein überaus starkes Gebiß mit langen dolchartigen Zähnen (Fig. 10), ein gewaltiges Maul sowie einen sehr erweiterungsfähigen Magen oder Magenblindsack. Manche können Beutetiere in ihren Magen packen, die größer sind als sie selbst.

5. Die Verbreitung der Tiefseetiere. 5a) Grundfauna und pelagische Fauna. In ihrer Gesamtheit lassen sich die Tiefseetiere in zwei große Gruppen einteilen, in die Grundformen und in die pelagischen Formen. Erstere führen ein Leben auf dem Boden des Meeres, es gehören hierher die Hexactinelliden, Polypen, Korallen, Echinodermen, viele höhere Krebse (besonders die Krabben), Muscheln, Schnecken und eine Anzahl von Fischen. Mannigfach sind ihre besonderen Anpassungen. Die Kieselschwämme wurzeln mit besonderen Kieselnadelschöpfen oder einzelnen Kieselnadeln im Schlamme. Viele Tiefseekrabben sind ausgezeichnet durch zarten Körperbau und lange schlanke, weit abstehende Beine, sie vermögen sich so leicht über dem weichen Schlamm schwebend zu erhalten. Andere Krebse, wie Nematocarcinus (Fig. 6), besitzen an den Endgliedern der Beine Büschel feiner Borsten, die gegen das Einsinken im Schlamm schützend wirken. Schlammfische wie Aphyonus und Barathronus zeigen eine Reduktion der Augen, gallertweichen schuppenlosen Körper, schwache Entwickelung der paarigen Flossen. Andere Bodenfische, die auf hartem steinigem Boden leben, sind im Gegensatz dazu, ähnlich wie Litoralfische, mit einem starken Schuppen- oder Stachelkleid bedeckt, wie beispielsweise die meisten Macruriden. Als Besiedelungsflächen kommen für Bodentiere hauptsächlich die nicht zu schroffen Abfälle zwischen 600 bis 1600 m Tiefe in Betracht, desgleichen die isolierten unterseeischen Bänke und Rücken in gleicher Tiefenlage. Dagegen sind die eigentlichen Tiefenbecken sehr viel spärlicher bevölkert, man hat sie mit den Wüsten des Festlandes verglichen. Eine Zusammenstellung aus der Mitte der neunziger Jahre des vorigen Jahrhunderts möge dies zahlenmäßig belegen. Es waren damals von bodenbewohnenden Tieren bekannt aus:

200 m	Tiefe etwa	4200	Arten
2000 m	Tiefe etwa	600	Arten
4000 m	Tiefe etwa	400	Arten
5000 m	Tiefe etwa	150	Arten.

Die zweite Gruppe von Tiefseetieren bilden die pelagischen oder besser die bathypelagischen Formen, welche völlig unabhängig vom Boden im freien Meeresraum sich aufhalten. Es gehören hierher die Radiolarien, Medusen, Siphonophoren, Ctenophoren, einzelne Holothurien, zahlreiche Krebse, Pteropoden, Heteropoden, zahlreiche Cephalopoden und die Mehrzahl der Fische. Bei ihnen allen treffen wir die charakteristischen Merkmale frei im Wasser schwimmender oder schwebender Organismen, Einrichtungen zur Erhöhung der Schwebefähigkeit in mannigfachster Form, Ausstattung mit vortrefflichen Bewegungs- und Sinnesorganen.

5b) Vertikal- und Horizontalverbreitung. Ueber die Vertikalverbreitung sind wir noch nicht allzu genau unterrichtet, da die Vertikalnetzfänge, denen wir zumeist die pelagischen Organismen der Tiefsee verdanken, eben keine Auskunft über den genaueren Aufenthaltshorizont geben, und die Ergebnisse der Schließnetzfänge nicht allzu reichlich sind. Im allgemeinen muß wohl angenommen werden, daß die pelagischen Tiefseetiere sich in sehr wechselnden Wasserschichten aufhalten, ja daß viele während der Nacht bis in oberflächliche Schichten vordringen. Man hat direkt bestimmte und ganz regelmäßige Vertikalwanderungen feststellen können, insofern im Mittelmeer die pelagischen Organismen, welche während des Winters und Frühjahrs die Oberfläche bevölkern, im Sommer von hier sich zurückziehen und in bis über 1000 m Tiefe hinabgehen. Es ist im besonderen wohl hier die hohe Temperatur der Oberflächenwasser, welche sie in die Tiefe treibt.

Wenig unterrichtet sind wir auch noch über die Horizontalverbreitung. Im allgemeinen scheinen die Tiefseetiere eine sehr weite Horizontalverbreitung zu besitzen, wie die zunehmende Zahl der zur Verfügung stehenden Fänge immer mehr hervortreten läßt. Und dies ist ja auch leicht verständlich, da der Lebensbezirk der Tiefsee ein großes zusammenhängendes Ganzes bildet und fast überall gleichmäßige Existenzbedingungen aufweist, einer horizontalen Ausbreitung der Organismen also keine Hindernisse im Wege stehen.

6. Die Herkunft der Tiefseetiere. Mit dieser Frage eng verbunden ist das Problem der Entstehung der Tiefseebecken selbst. Zweifellos sind so ziemlich alle Teile des Festlandes seit dessen erstem Auftauchen wieder-

holt Meeresboden gewesen, trotzdem sind nirgends mit Sicherheit auf dem Festland Ablagerungen nachgewiesen, die mit den heutigen Tiefseesedimenten zu vergleichen wären. Es müßten demnach alle Ueberflutungen des Festlandes stets nur zur Bildung von Flachseegebieten geführt haben, woraus man dann weiter auf eine große Konstanz der allgemeinsten Grundzüge des Oberflächenreliefs der Erde schließen kann, mithin auch auf eine lange Zeit zurückreichende Dauer der wirklichen Tiefenbecken der Ozeane.

In der heutigen Tiefsee ist nun bis jetzt noch fast kein einziges paläozoisches Tier gefunden worden, weder unter den Korallen, noch unter Echinodermen, Krebsen, Cephalopoden oder Fischen. Wogegen altertümliche Formen sehr wohl in der Flachsee leben, wie Arca, Leda, Pleurotomaria, Nautilus unter den Mollusken, wie Astropecten unter den Seesternen, wie Limulus als letzter Vertreter der silurischen Schwertschwänze, wie Amphioxus unter den Fischen. Von Brachiopoden finden sich wohl einige kambrische (Discina) und devonische (Terebratula) Formen in der Tiefsee, noch mehr aber in der Flachsee (Lingula, Rhynchonella usw.). Dagegen zeigt die unterhalb der 2000 m-Linie lebende Tierwelt enge Beziehungen zum Mesozoikum (Trias, Jura, Kreide). Von Tiefseeformen, deren älteste Vertreter dem Mesozoikum angehören, wären zu nennen die Euretiden unter den sechsstrahligen Kieselschwämmen, die Turbinoliden unter den Korallen, die Pentacrinen unter den Seelilien, Ophioglypha und Asterias unter den Seesternen, Echinus unter den Seeigeln, Penaeus unter den Krebsen. Ihre Einwanderung kann also frühestens zur Triaszeit erfolgt sein. Die nächsten Verwandten der oberjurassischen Krebsgattung Eryon sind die überaus charakteristischen Tiefseekrebse Pentacheles, Willemoesia, Polycheles. Die meisten Tiefsee-Seeigel sind mit Kreidegattungen verwandt, die Tiefseekorallen gehören fast sämtlich Gattungen der Kreidezeit an. Und andererseits sind bezeichnende Tertiärformen in der Tiefsee wieder nur selten anzutreffen. Es trägt also die Tiefseefauna im allgemeinen mesozoischen Charakter. Und das läßt sich in einen bestimmten Zusammenhang mit den großen geologischen Umgestaltungen der Erdoberfläche bringen. Im allgemeinen haben Hebungen von Gebirgsketten entsprechende ausgedehnte Senkungen an anderen Orten im Gefolge. Und da sich nun geologisch nachweisen läßt, daß die gewaltigsten und ausgedehntesten Kettengebirge in der Zeit zwischen Karbon und Trias entstanden, so werden sich wohl auch in dieser Zeit die tiefen Ozeanbecken gebildet haben, zu dieser Zeit konnte dann auch naturgemäß erst ihre Besiedelung einsetzen.

Hinsichtlich des eigentlichen Vorgangs der Besiedelung der Tiefseebecken ist jetzt durchaus die Ansicht vorherschend, daß diese Besiedelung von der Flachsee her erfolgte. Wahrscheinlich waren es Formen, welche in den noch vom Lichte durchdrungenen mittleren Tiefen sich aufhielten, die sich allmählich dem Leben in der Tiefsee unter den mannigfachen, oben beschriebenen Veränderungen anpaßten. Dies gilt beispielsweise für die Tiefseekrabben, dies gilt für viele Tiefseefische, so vor allem für die Macruriden und Zoarciden, die jetzt am reichsten in der Tiefsee vertreten sind.

Nach alledem wäre also die Tiefsee kein ursprünglicher, seit den ältesten Zeiten der festen Erde bestehender Lebensbezirk und mit dieser Erkenntnis verliert die Tiefsee durchaus den geheimnisvollen Zauber, mit dem man sie wohl früher als dem Ursprungsort niederster und einfachster Lebensformen zu umgeben pflegte.

Literatur. **A. Agassiz**, *Three cruises of the steamer „Blake", vol.* II. *Bullet. Mus. Harv. Coll., vol.* XV, *1888.* — **A. Brauer**, *Die Tiefseefische. Wissensch. Ergebn. Deutsch. Tiefsee-Exped., Bd.* XV, *1906/08.* — **Challenger-Reports**, *besonders: Narrative 1885 und Summary 1895.* — **C. Chun**, *Die pelagische Tierwelt in größeren Meerestiefen. Bibl. Zool., Bd.* I, *1888.* — **Derselbe**, *Atlantis. Bibl. Zool., Heft 19, 1896.* — **Derselbe**, *Aus den Tiefen des Weltmeeres, 1900, 1903.* — **Derselbe**, *Ueber Leuchtorgane und Augen von Tiefseecephalopoden. Verh. Deutsch. Zool. Gesellsch., 1903.* — **Derselbe**, *Die Cephalopoden. I. Oegopsida. Wissensch. Ergebn. Deutsch. Tiefseeexped., Bd.* 18, *1910.* — **F. Doflein**, *Brachyura. Wissensch. Ergebn. Deutsch. Tiefsee-Exped., Bd.* 6, *1904.* — **Th. Fuchs**, *Ueber den Charakter der Tiefseefauna des Rothen Meeres. Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien,* 110. *Bd., 1901.* — **C. L. G. Günther**, *The exploration of the fauna of the Deep Sea. Presid. Adress. Proceed. Linn. Soc. London 1897.* — **H. Lohmann**, *Ueber die Beziehungen zwischen den pelagischen Ablagerungen und dem Plankton des Meeres. Internat. Revue Hydrobiol.,* 1. *Bd., 1908.* — **O. Maas**, *Die Aufgaben der Tiefseeforschung und die deutsche Tiefseeexpedition. Geogr. Zeitschr., 4. Jahrg., 1908.* — **E. von Marenzeller**, *Die Nahrung der Tiefseetiere. Schrift. Ver. Verbr. Naturw. Kenntn. Wien,* 33. *Bd., 1893.* — **W. Marshall**, *Die Tiefsee und ihr Leben. Leipzig 1888.* — **J. Murray und E. Philippi**, *Die Grundproben der Deutschen Tiefseeexpedition. Wissensch. Ergebn. Deutsch. Tiefseeexped.,* 10. *Bd., 1908.* — **G. Schott**, *Ozeanographie und maritime Meteorologie. Wissensch. Ergebn. Deutsch. Tiefseeexped.,* 1. *Bd., 1902.* — **O. Seeliger**, *Tierleben der Tiefsee. Leipzig 1901.* — **J. Walther**, *Bionomie des Meeres. Die Lebensweise der Meerestiere. Jena 1893.* — **Derselbe**, *Ueber Entstehung und Besiedelung der Tiefseebecken. Naturwissensch. Wochenschr. 1904.*

Johannes Meisenheimer.

Tiemann

Ferdinand.

Geboren am 10. Juni 1848 zu Rübeland im Harz, gestorben in Berlin am 14. November 1899 als ordentlicher Honorarprofessor der Chemie an der Universität, begann er seine Studien als Apotheker in Braunschweig am Collegium Carolinum, vollendete sie als Chemiker unter Leitung A. W. Hofmanns, in dessen Bannkreis er blieb. Seine außerordentlich zahlreichen Experimentalarbeiten, deren viele mit Schülern gemeinschaftlich ausgeführt wurden, sind fast ausschließlich in den Berichten der deutschen Gesellschaft erschienen und betreffen meist Gegenstände der organischen Chemie, die ihm viel verdankt. Ganz besonders ist er durch Erforschung und künstliche Darstellung einer Reihe wichtiger Riechstoffe hervorgetreten. Die Bildung von aromatischen Oxyaldehyden, die von Vanillin, von Jonon und damit die Aufklärung der chemischen Konstitution dieser sowie anderer Stoffe z. B. Citral, Cineol, Carvol gehören zu den schönsten Früchten seines Schaffens, wobei ihm W. Haarmann, P. Krüger, G. de Laire als treffliche Mitarbeiter zur Seite standen. Zahlreiche von seinen Schülern ausgeführte Abhandlungen betreffen die von ihm aufgefundenen Amidoxime.

Von Einzelschriften ist sein mit Kubel, in dritter Auflage mit Gärtner herausgegebenes Werk „Anleitung zur Untersuchung des Wassers" von Bedeutung. Dasselbe zeichnet sich durch die sorgsame Kritik der einschlägigen Methoden aus. Der deutschen chemischen Gesellschaft hat Tiemann einen beträchtlichen Teil seiner Arbeitskraft uneigennützig gewidmet; er war 24 Jahre lang ihr Schriftführer, davon 15 Jahre lang ihr Redakteur. Ein von O. Witt liebevoll geschriebener Nekrolog gibt Aufschluß über sein Leben und Wirken.

E. von Meyer.

Tierpsychologie.

1. Historischer Ueberblick. 2. Gegenstand und Bedeutung der Tierpsychologie. 3. Berechtigung der Tierpsychologie. 4. Forschungsmethoden. 5. Interpretationsmethoden. 6. Verschiedene Formen des tierischen Verhaltens. 7. Der Instinkt. 8. Die Intelligenz. 9. Die Frage der Tropismen. 10. Die geistige Entwickelung.

1. Historischer Ueberblick. Von jeher hat man den geistigen Zustand der Tiere auf sehr verschiedene Weise beurteilt. Bald erachtete man ihren Verstand als beinahe demjenigen der Menschen gleichbedeutend, bald sah man sie als bloße Maschinen an. Zwar gab schon Aristoteles eine gute Beschreibung des geistigen Zustandes der Tiere: „Die Tiere fühlen, wünschen und erinnern sich, sie denken aber nicht". Bis zu Descartes war diese Ansicht fast allgemein verbreitet. Jedoch im 16. Jahrhundert wollte Rorarius in seinem berühmten Werke „Quod animalia bruta saepe ratione utantur melius homine", beweisen, daß die Tiere besser als die Menschen überlegen, und vom 11. bis zum 17. Jahrhundert wurden in gewissen Ländern die Tiere nach begangener Missetat sogar gerichtlich vorgeladen (vgl. Chassanée, De excommunicatione animalium insectorum. Lyon 1531).

Descartes verdanken wir die erste wissenschaftliche Theorie über das Verhalten der Tiere; dieser Philosoph, für den das Wesen der Seele in einem sich selbst bewußten Denken lag, verweigerte den Tieren eine Seele, da kein Beweis vorhanden sei, daß sie nachdächten. Er betrachtete sie als bloße Automaten. Die Theorie war genial, da sie die zukünftige Physiologie voraussah, die ebenfalls die Tätigkeit des Organismus auf rein mechanische Weise zu erklären sucht. — Während einem Jahrhundert wurde die Automatismustheorie lebhaft erörtert, besonders von seiten der Theologen: die einen fanden sie einleuchtend, weil sie die schwierige Frage der Unsterblichkeit der Tierseele aufhob, die anderen verwarfen sie als der Lehre Aristoteles' entgegenstehend; sie befürchteten überdies, daß durch das Leugnen einer Tierseele die Ungläubigen dazu kämen, selbst dem Menschen eine Seele abzusprechen.

Im großen und ganzen verlor die Lehre des Automatismus während des 18. Jahrhunderts beständig an Boden. Condillac bekämpfte sie (Traité des animaux. Paris 1755), ebenso Leroy (Lettres philosophiques sur l'intelligence des animaux. Paris 1781).

Ch. Bonnet (1764) hält hingegen eine rein mechanische Erklärung über das Verhalten des Polypen für möglich; verschiedentlich greift er in seinen Schriften die anthropomorphische Tendenz an. Indem er, im Gegensatz zu der Philosophie seiner Zeit, die Identität der Seele des Tieres mit derjenigen des Menschen annimmt, bemüht er sich so viel wie eben möglich, das Verhalten des Tieres als eine Folgerung seiner Körper- oder Gehirnstruktur zu erklären. Bonnets schöne Beobachtungen der Insekten haben diejenigen F. Hubers über die Bienen (Genf 1792) hervorgerufen, welche ihrerseits die P. Hubers über die Ameisen (Genf 1810) veranlaßt haben. So gelangen wir ins 19. Jahrhundert.

Während der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts ist die Tierpsychologie vernachlässigt worden. Dann, unter dem Einfluß der Darwinschen Ideen, wurde das Studium der Tierpsychologie wieder eifrig aufgenommen, aber mit einer Tendenz, die Intelligenz der Tiere zu übertreiben, um die zwischen dem Menschen und dem Tiere bestehende Kluft zu vermindern (Romanes, Buchner, C. Vogt, Brehm). Gegen Ende vorigen Jahrhunderts hat sich eine neue Reaktion in der kartesianischen Richtung bemerkbar gemacht (Loeb, Bethe usw.). Aber auch

zur gleichen Zeit nahm der Vitalismus einen neuen Aufschwung (Driesch, Schneider usw.).

1898 hat Thorndike auf systematische Art die Experimentalmethode zum Studium der Tierpsychologie angewandt und so die Arbeiten der amerikanischen Schule (Yerkes, Watson, Parker, Holmes, Cole usw.) eingeleitet. 1911 ist in Boston eine Zeitschrift erschienen, die sich ausschließlich der experimentellen Tierpsychologie widmet: The Journal of animal behavior.

2. Gegenstand und Bedeutung der Tierpsychologie. Die Tierpsychologie hat zum Gegenstand das Studium der psychischen Prozesse der Tiere, deren Regelmäßigkeiten, deren Korrelationen mit den begleitenden physiologischen Phänomenen. Was für eine Bedeutung kann ein solches Studium haben? Welche Interessen verfolgt es?

Diese Interessen sind vielfach, teils theoretisch, teils praktisch. Die Biologie stellt Probleme, welche in das Fach der Tierpsychologie einschlagen. So z. B. dasjenige des Ursprungs der Instinkte. Auch für die Entwickelungsgeschichte ist es von Interesse, die vergleichende Anatomie durch die vergleichende Psychologie zu ergänzen. Die Botanik hat sich ihrerseits mit der psychologischen Frage beschäftigt, ob die Insekten Farben wahrnehmen und ob die Farben der Blumen zu der notwendigen Befruchtung durch die Insekten in Beziehung stehen. Die Tierpsychologie ist auch eine natürliche Ergänzung der Menschenpsychologie. Im Verein mit der Kinderpsychologie bildet sie eine besondere Methode: die psychogenetische Methode, welche die Analyse der Funktionen ermöglicht, indem sie die aufeinander folgenden Stadien ihrer Entwickelung prüft. Die Tierpsychologie dient ferner dazu, bei den Tieren bestimmte, an den Menschen festgestellte Gesetze zu prüfen (z. B. die Gesetze des Gedächtnisses). Die Vergleichung zwischen dem Verhalten des Tieres mit demjenigen des erwachsenen Menschen oder des Kindes bildet ein ausgezeichnetes Mittel der Analyse, indem durch sie die dem menschlichen Geiste eigenen Merkmale hervortreten (vgl. z. B. die lehrreichen Versuche von Katz und Revesz, Zeitschrift für Psychologie Bd. 50, welche zeigen, daß das Lösen einer Aufgabe durch Hühner, einer Aufgabe, die Kindern erst mit 4½ Jahren gelingt, auf rein mechanische Einprägung bei den Hühnern hinweist). Die Tierpsychologie ist auch eine Hilfsdisziplin für die Anatomie und Physiologie der nervösen Zentralorgane und der Sinnesorgane.

Um z. B. die Funktionen des Hirnmantels zu bestimmen, ist es unerläßlich, das Verhalten der Tiere zu studieren, bei welchen dieses Organ noch fehlt oder erst im Begriff ist aufzutreten (vgl. die Enquete, die Edinger im Jahre 1897 angestellt hat, um zu erfahren, ob die Fische ein Gedächtnis haben). Um die psychologische Funktion zu bestimmen, welche durch die Zerstörung eines Hirnlappens aufgehoben worden ist, muß man ebenfalls an Hand einer psychologischen Untersuchung des Tieres vorgehen (vgl. die Arbeiten von Kalischer über die Funktion des Schläfenlappens 1907). Ein Beispiel des Nutzens der Tierpsychologie um die Funktionen gewisser Partien eines Sinnesorganes zu bestimmen, haben die Experimente von Katz und Revesz geliefert, die gezeigt haben, daß das Purkinjesche Phänomen beim Huhne, welches letztere eine an Stäbchen sehr arme Netzhaut besitzt, nicht mehr ausschließlich durch die Funktionsweise der Stäbchen erklärt werden kann (Ges. der Wiss., Göttingen 1907). — Die Tierpsychologie ist endlich auch von Bedeutung für die Philosophie und die Erkenntnistheorie (vgl. Bergson, L'évolution créatrice. Paris 1907).

Von direkt praktischem Interesse ist die Tierpsychologie für die Zähmung noch wilder Tierarten; eine Frage von großer ökonomischer Bedeutung, die erst dann gelöst werden kann, wenn man durch eine bessere Kenntnis der Tierpsychologie dahin gelangt, die Faktoren zu kennen, welche den Fortpflanzungstrieb bei den wilden Tieren vernichten, sobald sie sich in Gefangenschaft befinden (Hachet-Souplet, Les bases psychol. de la domestication. Rev. scientif. sept. 1912).

Erwähnen wir noch den praktischen Nutzen, den die Tierpsychologie für die Pädagogik haben kann; das tierpsychologische Experimentieren kann nützlich sein für die Ausbildung des Lehrertalents; praktische Uebungen in Tierpsychologie würden besser als irgendein anderer Gegenstand die beiden wichtigen Eigenschaften jedes guten Lehrers entfalten, nämlich die Fähigkeit andere Geister zu verstehen, d. h. Toleranz und Sympathie, und ferner Geduld und Milde (vgl. meinen Aufsatz: Die Bedeutung der Tierpsychologie für die Pädagogik, Z. f. päd. Psych. XI, 1911).

3. Berechtigung der Tierpsychologie. Man hat die Möglichkeit einer Tierpsychologie geleugnet; um weiter gehen zu können, müssen daher die drei wichtigsten Argumente, die man gegen dieselbe geltend gemacht hat, zuerst geprüft werden:

1. Unmöglichkeit die Bewußtseinsprozesse der Tiere zu kennen. — Jedermann kennt das Subjektive, das Psychische nur aus sich selbst; außerhalb sich selbst beobachtet man nur Bewegungserscheinungen; eine Tierpsychologie ist also unmöglich. So sprechen mehrere Biologen (Netter 1883; H. E. Ziegler 1892; Beer, Bethe, v. Uexküll 1899; Nuel 1904; Jordan 1905; Zur Strassen 1908). Dieses negative Verhalten in bezug auf die Tierpsychologie ist eine Reaktion gegen die anthropomorphischen Uebertreibungen vieler

früherer Forscher. Aber man sollte nicht das Kind mit dem Bade ausschütten und die psychologische Erklärung verdammen, weil sie einigemale mißbraucht worden ist. Diese psychologische Interpretation des Verhaltens der Tiere durch Analogieschlüsse, hat an sich nichts prinzipiell Unwissenschaftliches. Wenn dies der Fall wäre, so wäre es unmöglich, die Psyche unserer Mitmenschen, der Kinder, der Geisteskranken zu studieren. Diese Studien erweisen sich nun in der Tat als fruchtbar. Das Fehlen der Sprache bei den Tieren bereitet ohne Zweifel der Tierpsychologie eine große Schwierigkeit, indem es uns der wichtigsten Quelle der das innere Leben enthüllenden Zeichen beraubt. Aber es handelt sich hier nur um eine Schwierigkeit, nicht um eine prinzipielle Unmöglichkeit. Denn selbst die Sprache unserer Mitmenschen ist an sich ein objektives Phänomen und wir schließen durch Analogie nach der Sprache auf die Bewußtseinsprozesse in ihnen. — „Die Naturwissenschaft hält sich für berechtigt, Körper zu setzen und zu bestimmen, die niemand wahrnimmt. Die Psychologie braucht ebensowenig die Annahme psychischer Vorgänge zu scheuen, welche nicht aufgefaßt werden" (O. Külpe, Die Realisierung. Leipzig 1912, S. 172).

2. Nur eine physiologische Erklärung des Verhaltens ist wissenschaftlich. — Dieser zweite Einwand gegen die Tierpsychologie gründet sich auf die Heterogeneität des Psychischen und Physischen. Zwischen den physiologischen und psychischen Phänomenen kann es gar keinen Kausalnexus geben; es ist infolgedessen unnütz, sich mit den psychischen Prozessen der Tiere zu beschäftigen, da in keinem Fall diese psychischen Prozesse als Faktoren des Verhaltens betrachtet werden können oder dazu dienen, sie zu erklären.

Beer, Bethe, Uexküll haben sogar eine objektivierende Nomenklatur vorgeschlagen, um die psychologischen Bezeichnungen vollständig auszuschließen. Hier einige vorgeschlagenen Modifikationen:

Empfindung	ist ersetzt durch	Rezeption
Sinnesorgan	„ „ „	Rezeptionsorgan oder Rezeptor
Tastempfindung	„ „ „	Tangorezeption
Gesichtsempfindung	„ „ „	Photorezeption
Gehörsempfindung	„ „ „	Phonorezeption
Auge	„ „ „	Photorezeptionsorgan
Sehen	„ „ „	Photorezepieren
Gedächtnis	„ „ „	Remanenz des Reizes
Reaktionsbewegung	„ „ „	Antikinese (in immer gleicher Weise wiederkehrende = Reflex; modifizierbar = Antiklise) usw.

Wir berühren hier die so dunkle und so umstrittene Frage der Beziehungen zwischen Seele und Körper; je nach der Auffassung dieser Frage gibt man eine verschiedene Antwort auf den oben erwähnten Einwand.

So nehmen die Anhänger der Tierpsychologie verschiedene Stellungen ein. Die spiritualistischen Psychologen verteidigen aus philosophischen Gründen den Einfluß der Seele auf den Körper (z. B. Wasmann); für die Psychovitalisten ist die Anpassung nur faßlich mittels der Intervention eines supramateriellen Prinzips, welches die Fähigkeit besitzt, die Mittel dem für den Organismus nützlichen Endzweck anzupassen und die Einheit und Harmonie seiner Reaktionen aufrecht zu erhalten. Dieses Prinzip wird von dem einen (Driesch) als objektiv betrachtet, während die anderen (Schneider, Lukas, Mc Dougall) es mit dem subjektiven Bewußtsein identifizieren. Zu diesen letzteren könnte man alle Interaktionisten rechnen, welche einen Kausalnexus zwischen dem Psychischen und dem Physischen annehmen, teils weil sie das Psychische als eine Form der Energie betrachten (Ostwald), teils weil sie nicht zulassen, daß das Postulat des wissenschaftlichen Determinismus die Behauptung der Erhaltung der Kraft einschließt (Busse).

Eine dritte Gruppe bilden die Monisten, die Panpsychisten, für welche das Bewußtsein jede nervöse Tätigkeit oder sogar jeden Lebensprozeß begleitet und wovon es nur eine subjektive Seite ist (Identitätslehre, Haeckel, Forel); nach dieser Auffassung ist ein Bewußtsein bei allen Wesen vorhanden. Diese Identitätslehre aber ist eine metaphysische Lehre und als solche darf sie die Schwelle der positiven Wissenschaft nicht überschreiten. Das Parallelismusprinzip ist ihm vorzuziehen. Es drückt den Zusammenhang zwischen den psychischen und physischen Prozessen aus, ohne jedoch eine Meinung über die endgültige Ursache der Parallelität auszusprechen. Es ist einfach ein heuristisches Prinzip, welches jegliche metaphysische Erörterung über das Verhältnis der Seele und des Körpers von dem Gebiet der Wissenschaft ausschließt.

Wie ersichtlich, stützen sich die Verteidiger der vergleichenden Psychologie auf sehr verschiedene Beweisgründe; diese sind auf zwei Hauptbeweise zurückzuführen: für die einen ist das Psychische ein unumgänglicher Faktor, um das Verhalten des Tieres zu verstehen; demnach verzichten wir auf ein unerläßliches Erklärungsmittel, wenn wir das Bewußtsein des Tieres außer acht lassen. Für die anderen ist das Bewußtsein einfach eine Begleiterscheinung der Nerventätigkeiten; es greift nie in die Bestimmungen physiologischer Phänomene ein, und die Folge davon ist, daß die An-

nahme eines Bewußtseins bei den Tieren keineswegs die mechanische Physiologie vernichtet.

Was soll man von diesen beiden Ansichten halten, welche durch die Ausdrücke Psychovitalismus und Parallelismus gekennzeichnet werden können? Kein ausschlaggebender Beweis kann heute zugunsten der einen oder der anderen Auffassung der Wissenschaftler und Philosophen beigebracht werden. Obgleich aber der Psychovitalismus auf Beweggründen fußt, welche nicht ohne Wert sind (s. die Werke von Driesch, von Mac Dougall, Schneider usw.), kann man ihm doch nicht die Tore der experimentalen Wissenschaft öffnen, da er Begriffe einschließt, welche nicht in den Bereich der Wissenschaft gehören, und welche ihrer Grundtendenz entgegenstehen, nämlich alles auf im Raume darstellbare und aufeinander einwirkende Atome oder auf mathematisch feststellbare Kräfte zurückzuführen. Die Wissenschaft ist notwendigerweise farbenblind für Prozesse, welche außerhalb des Raumes stattfinden (wie die „Psychoide" von Driesch, oder die „Finalia" von Schneider) und nie in das Gebiet der Wissenschaft einschlagen, da dieselbe ihre Methode der Analyse und des Maßes bei ihnen nicht anwenden kann, und entwaffnet vor ihnen steht. Diese Prozesse können demnach nie als „wissenschaftliche" Erklärungsprinzipien gelten.

Der Parallelismus, für welchen die psychischen Prozesse nur Begleiterscheinungen und nie die Ursache oder das Ergebnis der physischen Prozesse sind, steht im Gegenteil keineswegs im Widerspruch mit den mechanistischen Prinzipien der Wissenschaft. Die Anhänger des Parallelismus können demzufolge die Rechtmäßigkeit der vergleichenden Psychologie zulassen, ohne darum die Möglichkeit einer rein physiologischen Erklärung des Verhaltens der Tiere zu verwerfen.

Aber wozu dann eine psychologische Erklärung geben, wenn die physiologische überall möglich ist? Die Antwort darauf ist leicht. Die psychologische Erklärung interessiert mehr den Psychologen, die physiologische und physiko-chemische sind allein für die Physiologen von Wert. Genau dieselbe Frage betrifft die Menschenpsychologie, bei welcher der Parallelismus auch für jede Tätigkeit zwei mögliche Erklärungen voraussieht: eine psychologische oder psychophysiologische und eine rein physiologische.

Die Physiologen sind vollkommen im Recht, sich nicht mit dem Bewußtsein des Tieres zu beschäftigen; sie haben nicht nur das Recht, sondern auch die Pflicht, über das Verhalten der lebenden Wesen eine rein mechanistische Erklärung abzugeben. Die einzige kritische Bemerkung, welche man gegen sie machen könnte, ist die, sich für ihre Arbeiten der Bezeichnung „Tierpsychologie" zu enthalten (vgl. die Schriften von Zur Strassen, Bohn; sogar Loeb sagt: „Ich halte es aber nicht für nötig, den Namen ‚Vergleichende Psychologie' aufzugeben." VI. int. Kongreß für Psychologie, Genf 1909, S. 303). Dieser Mißbrauch des Ausdrucks war die Quelle vieler Mißverständnisse.

Warum interessiert die psychologische Betrachtung der Tätigkeit der Tiere den Psychologen mehr als ihre rein mechanische oder physiko-chemische Betrachtung? — Weil der mechanistische Standpunkt zur Folge hat, das Subjekt vollständig aufzulösen, in Staub zu verwandeln. Für den Mechanisten sind nur die gegenwärtigen physiko-chemischen Prozesse, welche eine Bewegung erzeugt haben, von Interesse. Was für eine Rolle diese Bewegung in der Gesamtheit der Tätigkeit des Tieres spielt, ist eine Frage, welche für die Physiko-Chemie gar keinen Sinn hat. Der Psychologe hingegen interessiert sich nicht nur für die gegenwärtige Beschaffenheit des Organismus, sondern auch für die vergangenen Beweggründe, die den jetzigen Reaktionen, welche das Tier bekundet, zugrunde liegen. Die Psychologie eines Wesens feststellen, heißt die Ursachen seiner Reaktion studieren, indem man sich auf seine vergangene Geschichte bezieht, und diese Reaktionen in ihrer gegenwärtigen oder zukünftigen Bedeutung für das Individuum betrachten. Ein Hund z. B. scheint furchtsam. Warum verhält er sich so? Der Mechanist wird sagen, weil in diesem Augenblick in seinen nervösen Zentralorganen sich gewisse chemische Substanzen befinden, welche die Fluchtreaktionen des Tieres „sensibilisieren"; diese Substanzen sind durch chemische Zersetzungen, welche in den nervösen Zentralorganen durch gewisse Reize der Netzhaut stattgefunden haben, entstanden. Diese Erklärung aber, so gerechtfertigt sie auch an sich sein mag, hat gar kein Interesse für den Psychologen, weil sie nicht der Frage entspricht, welche er sich gestellt hat. Denn er will wissen, warum es gerade diese „Sensibilisierungen" und keine anderen sind, welche jetzt durch den Reiz der Netzhaut entstehen; mit anderen Worten: was in der vergangenen Geschichte des Tieres erklärt diese Art von Reaktion gegenüber einem gewissen Reiz? Während für den Mechanisten die physiko-chemische Analyse eines Prozesses die vollständige Erklärung liefert, wirft diese Analyse für den Psychologen nur eine neue Frage auf, die Frage der Entstehungsgeschichte dieses Prozesses und diejenige seines Nutzens in den vorliegenden Umständen, in denen das Tier lebt.

Vom mechanistischen, wesentlich analy-

tischen Standpunkt aus, werden die Tätigkeiten und das Verhalten der Tiere in eine Reihe von Reaktionen, Bewegungen und Kinesen zerlegt. Aber das, was gerade das Interesse dieser Reaktionen für den Psychologen ausmacht, ist ihre Gesamtheit, denn nur diese Gesamtheit drückt das Verhalten des Tieres als ein Ganzes betrachtet aus. Diese Gesamtheit kann aber nur dann wahrgenommen werden, wenn wir uns auf den geistigen Zusammenhang beziehen, der ihr als Band dient und gewissermaßen ihr Schlüssel ist. Wenn wir nie selber weder Freude, noch Schmerz, noch Zorn empfunden hätten, dann wäre es uns nicht nur unmöglich, bei einem anderen Wesen die Bewegungen, welche diese inneren Zustände ausdrücken, zu verstehen, sondern wir würden uns nicht einmal bewußt sein, daß diese Bewegungen zu einem und demselben Ganzen gehören; wir würden nicht ihre Einheit bemerken und würden wahrscheinlich glauben, daß nur von einfachen Bewegungen oder zufälligem Zittern, wie Krämpfen oder Grimassen ohne Bedeutung, die Rede sein kann. Ohne diese psychologische Bezugnahme sähen wir vor lauter Bäumen den Wald nicht.

Wir hören z. B. einen Hund, während dem er schläft, knurren oder bellen. Wie könnten wir behaupten, daß er „träumte", wenn wir nicht psychologisch dächten? Nie würde die Physiologie mit ihren rein objektiven Methoden das Phänomen des Traumes entdeckt haben.

Wenn z. B. K. Groos, als er die Spiele der Tiere beschrieb, auf die psychologische Sprache hätte verzichten und nur von Antikinesen sprechen wollen, hätte er nie seine Aufgabe ausführen können, denn die verschiedenen Kinesen, durch die sich das Spiel der Tiere kund tut, können nur mit Vorteil klassifiziert werden, wenn man sich auf die psychologische Absicht oder auf das Gefühl, welches beim Spiele vorherrscht, bezieht: Nachahmungsspiele, Kampfspiele, Neugierspiele, Kokettierspiele usw.

Die rein mechanische Betrachtung der Tätigkeiten der Tiere hat manchmal den Nachteil gehabt, die Physiologisten zu veranlassen den Mechanismus gewisser Bewegungen auf ein gar zu einfaches Schema zurückzuführen. Z. B. Bethe, der von dem richtigen Prinzip ausgeht, daß ein Physiologe Bienen und Ameisen als Maschinen betrachten muß, hat sich hinreißen lassen sie zu einfacheren Maschinen zu reduzieren als sie wahrscheinlich in Wirklichkeit sind. So betrachtete Bethe z. B. die Rückkehr zum Nest oder das Mitteilungsvermögen der Bienen als einfache Reflexe, welche durch einen einfachen Reiz hervorgehoben worden sind (Chemotropismus usw.). Von Buttel, Forel und Wasmann haben gezeigt, daß in Wirklichkeit diese Phänomene viel verwickelter sind, und daß man gewisse Faktoren in Erwägung ziehen muß (wie z. B. Ortserinnerung, topographische Vorstellungen, Affekte), wenn man alle Seiten ihres Betragens verstehen will (vgl. Bethe, Dürfen wir den Ameisen und Bienen psychische Qualitäten zuschreiben? Pflügers Arch. 1898; v. Buttel, Sind die Bienen Reflexmaschinen? Biol. Ctrbl. 1900).

Wir stehen hier vor einem Irrtum der gleichen Art, wie der anthropomorphische Irrtum, aber im entgegengesetzten Sinne. Dieser Irrtum der Ultravereinfachung verurteilt das Prinzip der physiologischen Erklärung nicht mehr, als der anthropomorphische Irrtum das Prinzip der psychologischen Erklärung. Aber nur, wenn der Physiologe nicht vergißt von Zeit zu Zeit die Tätigkeit der Tiere mit dem psychologischen Auge zu betrachten, wird es ihm gelingen ihn zu vermeiden.

3. Die vergleichende Psychologie ist nur bei den Tieren, die Bewußtseinstatsachen aufweisen, gerechtfertigt. — Einige Physiologen behaupten, daß bei den höheren Tieren Bewußtsein existiert, während die niederen Tiere einfach Maschinen sind. Die Tierpsychologie hätte also nur für die ersteren Berechtigung. Aber die Fachmänner sind sich über die Grenze, die dem Bewußtsein im Tierreiche zu ziehen ist, nicht mehr einig. Edinger sieht diese Grenze bei den Batrachiern und einigen Fischarten; Loeb leugnet das Bewußtsein dem Frosche ab; Ch. Richet nimmt es für alle Wirbeltiere an, während nach Lukas einzig und allein die Protozoen und Schwämme bewußtlos sind. Wir werden später sehen, daß die zur Erkennung des Psychischen vorgeschlagenen Kiiterien unzureichend sind. Uebrigens hat diese Umgrenzung des Psychischen nur für den Psychovitalismus eine so große Bedeutung. Für die Parallelisten ist sie ohne Wert. Letztere nehmen in der Tat an, daß ein jedes dieser beiden Erklärungsprinzipien, das physiologische und das psychologische auf die ganze Tierreihe angewandt werden muß: nach der aufsteigenden (oder physiologischen) Methode geht man von den niederen Tieren aus und versucht es, das ganze Verhalten rein mechanisch zu erklären; nach der absteigenden (oder psychologischen) Methode geht man vom Menschen aus und versucht es im Tiere die Reaktionen und Stellungen wieder zu finden, die den die bestimmten Bewußtseinszustände begleitenden analog sind. Eine jede dieser Methoden ist gerechtfertigt und es liegt kein Grund vor, eine zugunsten der anderen aufzugeben. Man muß das Einfache dem Zusammengesetzten und nicht das Einfache dem Bewußten gegenüberstellen.

In der Tat wird sich bei den niederen Tieren die physiologische Methode als fruchtbringender erweisen; bei den höheren Tieren hingegen wird die andere Methode mehr Wert haben. Aber beide Methoden können gleichzeitig benutzt werden, sie ergänzen sich gegenseitig. Die Tatsachen zeigen im übrigen, daß eine jede mit Erfolg angewandt wurde und dies ist der beste Beweis zugunsten ihrer Berechtigung. Die Erfahrung

und nicht die Diskussion beweist den Wert einer Methode oder eines Prinzips: die Geschichte der Wissenschaft zeigt uns, „daß nur durch Aufstellung neuer, oft ganz entgegengesetzter Gesichtspunkte die Wissenschaften fortschreiten" (E. Picard, La science moderne. 1905 p. 136). Und wir machen die Beobachtung, daß die Autoren, deren Arbeiten für die Tierpsychologie den größten Wert haben, wie die beiden Huber, Lubbock, Fabre, Forel, Wasmann, Peckham, v. Buttel, Emery, Escherich, Fielde, Wheeler, Graber, Dahl, Morgan, Yerkes, Thorndike, Jennings, Lécaillon, Yung, usw. niemals die psychologische Sprache aufgegeben haben, ohne daß hierdurch Ungenauigkeiten in ihrer Beschreibung der Tatsachen entstünden.

4. Forschungsmethoden. Die Methoden der Tierpsychologie unterscheiden sich von denen der Normalpsychologie hauptsächlich durch die Tatsache, daß hier die Selbstbeobachtung nicht angewendet werden kann. Es bleiben also nur zwei Hauptverfahren, um die Psyche eines lebenden Wesens von außen zu studieren: das Studium seines Verhaltens und das Studium seines Baues. Die letztere Methode bildet speziell den Gegenstand der Arbeiten Edingers, und wir verweisen auf seinen Artikel (vgl. den Artikel „Gehirn").

Man kann das Verhalten der Tiere mit Hilfe der Beobachtung und des Experimentes studieren und dabei als Hilfsmethoden die genetische und die pathologische benutzen.

Beobachtung. Die reine Beobachtung hat eine sehr bedeutende Rolle im Studium des tierischen Geisteslebens gespielt und spielt sie noch heute. Ihr großer Vorteil ist, daß sie das Tier unter seinen normalen Lebensbedingungen zeigt. Die Beobachtung kann sich auf Tiere in der Freiheit und in der Gefangenschaft erstrecken. Beide Methoden haben, wie man leicht begreifen wird, ihre Vorteile und Nachteile.

Die pathologische Methode, die eine so große Rolle in den Tierexperimenten spielt, hat der reinen Beobachtung bis jetzt wenig Material geliefert. Die Geisteskrankheiten sind bei Tieren selten und ihre Deutung ist nur unsicher (vgl. Dexler, Die psychotischen Erkrankungen der Tiere. Prag. med. Woch. 1908). — Die genetische Methode wird auch nur sehr selten gebraucht; erwähnen wir hier die Beobachtungen von Perez über die geistige Entwickelung von Kätzchen (Paris 1881), die Arbeiten von Groos über die Spiele der Tiere, und das Tagebuch der Entwickelung junger Affen von Lashley und Watson (J. of an. beh. 1913).

Experiment. Das Experiment hat den großen Vorteil gegenüber der Beobachtung, daß es uns nicht nur zeigt, was das Tier tut, sondern, was es zu tun fähig ist.

Die Experimentiermethoden der Tierpsychologie (wie auch der Menschenpsychologie) teilen sich in zwei Kategorien, je nachdem es sich darum handelt, wie das Wesen rezipiert, oder wie es reagiert, wie es Aufgaben löst, eine Gewohnheit annimmt. Man kann der ersten dieser Gruppen den Namen analytisches Verfahren oder Einwirkungsverfahren geben, der zweiten synthetisches Verfahren oder Handlungsverfahren.

Einwirkungsverfahren. Hören die Fische? — Werden die Bienen durch die Farbe oder den Geruch der Blumen angelockt? — Unterscheiden die Mäuse die einzelnen Farben? — Unterscheiden die Wespen verschiedene Formen? — Derartige Fragen zu lösen, ist die Aufgabe des Einwirkungsverfahrens. Der Experimentierende verändert das Reizmittel solange, bis das Tier eine Reaktion zeigt, die beweist, daß es durch dieses Reizmittel oder seine Veränderung beeinflußt worden ist (Methode der direkten Reaktion), oder er bietet zwei Reizmittel dar, zwischen denen das Tier zu wählen hat (Wahlmethode).

1. Methode der direkten Reaktion. Die Reaktion, welche als Antwort gilt, kann zweierlei Natur sein: entweder ist sie eine natürliche Reaktion, z. B. eine Reflexbewegung, die durch den Reiz ausgelöst wird, oder eine erworbene Reaktion, z. B. eine durch Dressur beigebrachte Bewegung. Dieses Verfahren wurde in den letzten Jahren mit Erfolg in den folgenden beiden Formen angewandt:

a) Methode der vorbereitenden Dressur: man dressiert ein Tier (Affen, Hund), ein Nahrungsmittel, das sich vor ihm befindet, nicht eher zu essen, als bis es einen bestimmten Reiz, z. B. einen bestimmten Ton hört; wenn man einen anderen spielt, darf es sich nicht rühren. Indem man die dem „Freßton" ähnlichen Töne anschlägt, kann man seine Unterschiedsempfindlichkeit feststellen (Kalischer, Thorndike, Washburn).

b) Pawlovsche Methode: Wenn man einem Tier während des Fressens einen gewissen Gegenstand, z. B. eine farbige Scheibe zeigt, so wird sich diese Erregung an die Speichelsekretion assoziieren, und die Sekretion kann sich später sogar bei völliger Abwesenheit von Nahrungsmitteln einstellen. Der Moment, in dem der Speichel zu fließen beginnt, kann leicht mit Hilfe einer Fistel bestimmt werden. Wir haben somit ein neues Mittel, das uns festzustellen erlaubt, ob ein Tier einen gewissen Reiz wahrgenommen hat,

und ob es diesen von einem ähnlichen unterscheiden kann (Fig. 1).

Der Vorteil der Pawlovschen Methode gegenüber der Dressurmethode beruht auf der Sicherheit, die den Reflexphänomenen eigen ist; aber sie hat den Nachteil, eine Operation am Tiere vornehmen zu müssen.

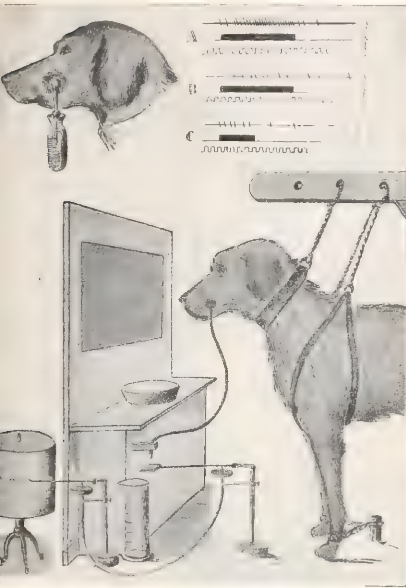


Fig. 1. Pawlovs Methode (mit Nicolais Modifikation der graphischen Registrierung) zur Feststellung des Speichelreflexes beim Hunde. Oben links: Gewichtsbestimmung des abgesonderten Speichels; oben rechts: graphische Darstellung der Speichelabsonderung A beim Fressen; B beim Sehen von Nahrungsmitteln; C beim Erblicken der bunten Scheibe.

2. Wahlmethode. Diese Methode macht sich die Vorliebe, die das Tier für ein bestimmtes Reizmittel hat, zunutze; wenn das Tier dieses Reizmittel aus der Zahl anderer, mehr oder weniger verschieden gestalteter, wählt, so ist das ein Beweis dafür, daß es sie zu unterscheiden vermag. Allerdings, wenn diese Vorliebe nicht vorhanden ist, so ist die Methode nicht zu gebrauchen. Dann müßte man dem Tier durch eine angemessene Dressur eine erworbene Vorliebe schaffen.

Dieser Methode gehört Yerkes Vorrichtung zur Feststellung des Farbenunterscheidungsvermögens bei Mäusen an (Fig. 2). Yerkes setzt die Maus in den Raum b des Kastens; wenn sie in ihr Nest bei a zurück will, kann sie entweder einen grün oder einen rot beleuchteten Gang benutzen. Aber jedesmal, wenn sie durch den roten Gang läuft, erhält sie einen elektrischen Schlag; dadurch lernt sie den roten Gang meiden, wodurch bewiesen ist, daß sie rot von grün unterscheiden kann. Selbstverständlich ist einmal der rechte, ein anderes Mal der linke Gang rot beleuchtet; die Wahl hängt also allein von der Farbe ab und nicht von der Raumlage. — Anstatt die Maus, die in den verbotenen Gang dringt, zu bestrafen (Strafmethode), kann man sie im Gegenteil belohnen, wenn sie ihn meidet (Belohnungsmethode); die Strafmethode ist von größerem Einfluß als die Belohnungsmethode; diese letztere ist nur von Wirksamkeit, wenn das Tier hungrig ist, während die Furcht vor Schmerz ein konstanter Faktor ist. — Zahlreiche Experimente mit dieser Methode sind von Kinnaman, Washburn, Porter usw. vorgenommen worden. — Die Wahlmethode wandte auch früher Forel an, um zu erfahren, ob die Wespen die Farben zu unterscheiden vermögen.

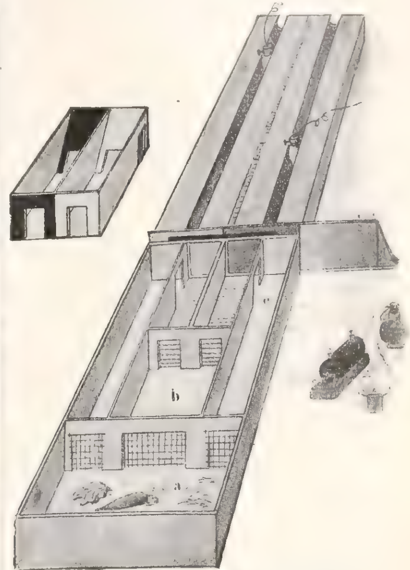


Fig. 2. Yerkes' Vorrichtung zur Feststellung des Farbenunterscheidungsvermögens bei Mäusen. Ein Raum wird rot, der andere grün beleuchtet, beim Eintritt z. B. durch die rote Tür erhält das Tier einen elektrischen Schlag und lernt dadurch die beiden Farben zu unterscheiden.

Die Wahlmethode könnte dazu dienen, nicht nur das Wahrnehmungsvermögen,

sondern auch das Verständnisvermögen, die Intelligenz zu studieren; in diesem Fall müßte das Experiment derart angestellt werden, daß die Wahl einen intellektuellen Vorgang voraussetzt.

Handlungsverfahren. Die Verfahrungsweisen dieser Gruppe suchen festzustellen, wie ein Tier eine Aufgabe löst, oder eine Gewohnheit annimmt; sie werden seit ungefähr 12 Jahren besonders von den amerikanischen Tierpsychologen angewendet.

Das Labyrinth. Das Labyrinth ist ein Käfig, dessen Inneres durch Wände eingeteilt ist, die eine Reihe von Gängen bilden, von denen einige blind endigen (Fig. 3). Man setzt das Tier

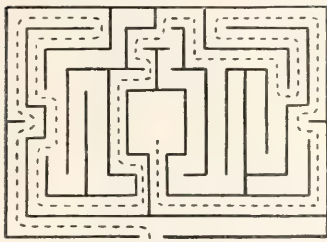


Fig. 3. Labyrinth; das Tier wird in das Zentrum gesetzt und muß den Ausgang suchen.

ins Zentrum des Labyrinths und veranlaßt es, den Käfig zu verlassen. Bei den Versuchen handelt es sich darum, zu untersuchen, wie das Tier sich allmählich an das Labyrinth gewöhnt. Die Momente, die zu dieser Bestimmung führen, sind einesteils die Zeit, welche das Tier zu jedem Versuch braucht, um in das Zentrum zu gelangen, anderenteils die Zahl der Irrtümer, welche es begeht; man zählt dabei als Fehler jeden Eintritt in einen blind endigenden Gang. Man kann dann Kurven konstruieren, die zeigen, mit welcher Schnelligkeit das Versuchtstier sich an das Labyrinth gewöhnt hat (Fig. 4).

Eine große Anzahl solcher Experimente sind von Thorndike, Small, Yerkes, Watson, Porter, Rouse, Schaeffer, Davis usw. mit Ratten, Schildkröten, Fröschen, Krebsen, Sperlingen, Affen, Waschbären, Regenwürmern usw. unternommen worden.

Oft hat man die Methode des Labyrinths mit der pathologischen Methode verbunden.

Der Vexierkasten. Der Vexierkasten ist ein Kasten aus Holz oder Drahtgeflecht, dessen Tür durch einen oder mehrere Kunstgriffe verschlossen ist, deren Ausführung das in den Kasten gesperrte Tier entdecken muß (Fig. 5). Man beobachtet dann, wie das Tier den Mechanismus des Schlosses entdeckt, und man mißt die Zeit, die es in jedem folgenden Fall zum Verlassen des Käfigs gebraucht.

Nachahmungsverfahren. Die Frage besteht darin, zu erfahren, ob ein Tier eine von einem anderen Wesen (Mensch oder Tier) ausgeführte ihm neue Handlung sich zu eigen machen kann. Man setzt zum Beispiel in einen Käfig zwei Tiere, von denen das eine den Trick heraus-

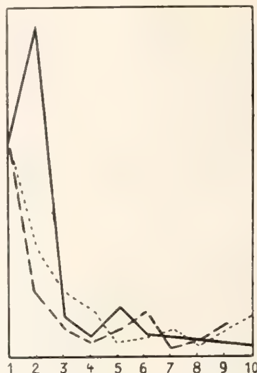


Fig. 4. Kurven der Lerngeschwindigkeit des Labyrinths: ——— von Affen, -------- von einer weißen Ratte, ·········· von einem Sperling. Auf der Abszisse sind die sukzessiven Versuche angegeben; auf der Ordinate die Zeit, die das Tier braucht, um das Labyrinth durchzugehen.

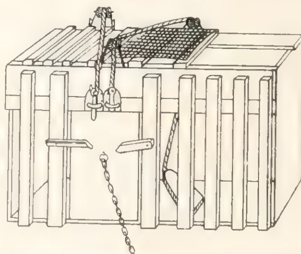


Fig. 5. Vexierkasten nach Thorndike

zukommen, schon kennt, das andere aber noch nicht. Man sieht nun zu, ob das letztere das Eingeweihte imitiert und wiederholt, was es hat machen sehen. Vgl. die Arbeiten von Berry über die Nachahmung bei Ratten und Katzen, und von Haggerty bei Affen, in Journ. of comp. Neur. 1906, 1908, 1909.

Führen wir hier das Isolations- und das Substitutionsverfahren an, das man bei jungen Tieren anwendet, um festzustellen, was sie der Vererbung und was der Nachahmung verdanken.

Kordelmethode. Dieses Verfahren, das von Franken beim Experimentieren mit einem Hund erfunden wurde, besteht darin, daß man

Nahrung an dem einen Ende einer Schnur befestigt, deren anderes Ende man dem angeketteten Hunde vorzeigt. Man beobachtet, ob der Hund die Beziehung zwischen der Kordel und dem Futter begreift.

Man könnte noch mehrere Methoden ausdenken, um die Intelligenz des Tieres, oder die Art, wie es eine Gewohnheit annimmt, zu studieren. Die angeführten Beispiele werden genügen.

Durch verschiedene Mittel kann man bei den tierpsychologischen Experimenten das Messen anwenden, indem man ähnliche Verfahren gebraucht, wie in der Menschenpsychologie: Methode der Reizfindung: Bestimmung der Größe des Reizes, der Dauer der Reizung usw. — Methode der Urteilsfindung: Verteilung der Urteile (der Wahlen) eines einzelnen Versuchstieres; Verteilung der verschiedenen Versuchstiere (statistische Methode); Bestimmung der Urteils oder Wahlzeiten. — Herstellungsmethode: Bestimmung der Dauer der Herstellung (z. B. der Dauer des Herausgehens aus dem Labyrinth) usw. — Ausdrucksmethode: Bestimmung der Größe der erzeugten Reaktion (Bewegungs-, Speichel-, psychogalvanische, Puls- und Atemreaktion); Bestimmung der Reaktionszeit.

5. Interpretationsmethoden. Nachdem nun die Beobachtung oder das Experiment gemacht ist, ist es nötig die beobachteten Tatsachen zu deuten, sie zu ordnen, die Ursache derselben zu finden und ihren psychologischen Charakter zu bestimmen. Dieser Teil der Aufgabe ist nicht der leichteste und verlangt viel Vorsicht. Zu dem Zweck ist es notwendig die Gesamtheit der Tatsachen gut zu betrachten und die Deutung nicht auf einem einzelnen Fall zu basieren.

So behauptete eine Zeitung, die die Rettung eines ins Wasser gefallenen Kindes durch einen Neufundländer erzählte, „daß diese Handlung wieder einmal die Intelligenz und die Hingabe der Hunderasse beweise". Nun hatte sich dieser Zwischenfall in folgender Weise zugetragen, wie dieselbe Zeitung erzählt: der Hund näherte sich dem Kinde, ergriff dessen Hut und brachte ihn ans Ufer, nachher erst ging der Hund, das Kind selbst zu suchen. Es ist augenscheinlich, daß der Hund in dem Falle nicht aus Intelligenz gehandelt hat, aber kraft einer Neigung oder einer Gewohnheit zu apportieren.

Die Fragen, die sich auf die psychologische Interpretation des Verhaltens eines Tieres beziehen, sind dreierlei: 1. Bewußtseinsfrage, 2. Komplexitätsfrage, 3. Funktionelle Frage.

1. Bewußtseinsfrage (Kriterien des Psychischen). — Man hat sich damit beschäftigt die Anzeichen herauszufinden, die es ermöglichen das Psychische in den Tieren zu erkennen. Diese Anzeichen können nur auf Analogien mit den beim Menschen gefundenen beruhen. Gewisse Forscher haben morphologische Kriterien vorgeschlagen: das Erscheinen der Psyche wäre an die Existenz eines Nervensystems gebunden (Forel), aber diese Auffassung kann durch keinen entscheidenden Grund gestützt werden. In der Tat sind einerseits nicht alle nervösen Vorgänge bewußt (so z. B. die Rückenmarksprozesse beim Menschen) und andererseits weisen die kein Nervensystem besitzenden Protozoen Tätigkeiten auf, die die Existenz eines Bewußtseins nahe legen[1]); deshalb fassen mehrere Autoren das Bewußtsein als eine Eigentümlichkeit jedes lebenden Wesens auf (Haeckel, Famynzin, Bechterew, usw.). Nach Edinger hingegen ist das Bewußtsein an die Existenz des Hirnmantels gebunden, der für das Gedächtnis notwendig ist.

Man hat auch verschiedene funktionelle Kriterien vorgeschlagen: die Lernfähigkeit (Bethe), das Gedächtnis (Richet, Edinger), das assoziative Vermögen (Loeb). Aber warum sollte das Bewußtsein stets an Gedächtnisfunktionen gebunden sein? Bei uns ist es nicht der Fall: die automatischen Handlungen, die Gewohnheiten sind größtenteils unbewußt, obgleich sie eine assoziative Tätigkeit bedingen, und andererseits wie könnte man den Tieren Bewußtseinsvorgänge versagen, wie Hunger, Schmerz, Affekte die nicht auf Lernfähigkeit beruhen! Ein solches Kriterium ist nicht nur illegitim, sondern auch unnütz („absurd" sagt Yerkes), denn die Fähigkeit von der Erfahrung zu profitieren ist schon eine Eigenschaft des Protoplasmas. Das Kriterium der Wahl (Binet) ist praktisch von keinem Wert, denn es kann auch auf die niedrigsten Organismen bezogen werden und andererseits besitzen gewisse anorganische Agentien die Fähigkeit zu wählen (so wählt ein Magnet Eisensplitter). Lukas hat den Vorschlag gemacht anzunehmen, daß ein Tierverhalten bewußt ist, wenn das Bewußtwerden gewisser Reize für den Organismus eine Bedeutung haben kann. So würden die Reflex-, Impulsiv- und automatischen Bewegungen, wie wir es von uns selbst wissen, ohne Bewußtsein erfolgen. Aber dieses Kriterium hat den Nachteil, daß es mit dem Parallelismus nicht vereinbar ist und voraussetzen läßt, daß das Bewußtsein als solches in die Kette der physiologischen Prozesse eingreift. Uebrigens können wir nicht versichern, daß die Reflex-

[1]) Jennings sagt: „Wenn die Amöbe ein großes Tier wäre, so daß es dem Menschen in den Bereich seiner alltäglichen Beobachtung käme, dann würde sein Verhalten sofort bewirken, daß man dem Tiere die Zustände von Lust und Schmerz, von Hunger und Begehren u. dgl. zuschriebe aus genau denselben Gründen, aus denen wir diese Dinge dem Hunde zuschreiben."

bewegungen bei den niederen Tieren unbewußt seien, weil sie bei uns unbewußt sind: vielleicht sind diese Reflexe von Gefühl geleitet, weil sie mit den Bedürfnissen des gesamten Organismus zusammenhängen, während es bei uns nicht mehr der Fall ist; wir finden übrigens bei uns Reflexe, die mit starkem Bewußtsein ausgestattet sind, es sind dies die Gemütsbewegungen, deren organische Grundlage in einer Unmenge kleiner Reflexbewegungen besteht.

Kurz zusammengefaßt sind all diese vorgeschlagenen Kriterien ungerechtfertigt oder unnütz. Suchen wollen, in welchem Momente das Bewußtsein im Tierreiche beginnt, ist eine vom Standtpunke des Parallelismus aus unmögliche Aufgabe und außerdem nutzlos. Die Tierpsychologie muß ein psychisches Leben, wie rudimentär es auch sei, bei jedem Tiere voraussetzen, denn sich mit der Tierpsychologie beschäftigen, heißt ja eigentlich jedes Tier als ein Subjekt betrachten, das zu gewissen der auf dasselbe einwirkenden Erregungen Stellung nimmt.

2. Komplexitätsfrage. Welcher Art sind die psychischen Prozesse, die die beim Tiere beobachtete Handlung hervorgerufen haben? Diese Frage ist die wichtigste, aber eine sehr schwierige; man tut gut daran, einen fruchtlosen Anthropomorphismus zu vermeiden, ohne hierbei in zu simplistische Erklärungen zu fallen, die den Tatsachen nicht Rechnung tragen. Die folgenden zwei Prinzipien könnten dem Forscher als Anleitung dienen.

Das Descartessche Prinzip. Descartes sprach den Tieren die in ihren Kunsttrieben anscheinend zutage tretende prächtige Intelligenz ab, und zwar aus dem Grunde, weil wenn diese Handlungen dem Verstande zugeschrieben werden könnten, die Tiere sich in anderen Verhältnissen nicht so dumm benehmen würden. Dieses Prinzip erinnert uns daran, daß wir den Grad eines geistigen Vorganges nicht nach einer Handlung beurteilen dürfen, sondern die Gesamtheit der von dem Tiere zutage geförderten Handlungen in Betracht ziehen müssen.

Dieses Prinzip ist im allgemeinen gut, aber von keiner absoluten Gültigkeit. Es geschieht sehr häufig, daß ein und dieselbe Person sich in einem bestimmten Falle sehr geschickt benimmt, während sie in einem analogen Falle ein anderes Mal dumm handelt; und doch wäre man nicht berechtigt zu behaupten, daß ihre intelligente Handlung in Wirklichkeit nicht intelligent wäre, unter dem Vorwande, daß dieselbe Person in einem anderen Falle nur Dummheit gezeigt hatte. Desgleichen könnten gewisse höhere Tiere bisweilen unter geeigneten Umständen eine besondere Intelligenz aufweisen, während hingegen das gewöhnliche Leben sie von diesen intellektuellen Leistungen entfernt, indem es sie in den leichteren Wegen der Routine und des Instinkts festhält.

Das Morgansche Prinzip. Dies ist das auf die Tierpsychologie angewandte Sparsamkeitsprinzip. Morgan hat dasselbe folgendermaßen formuliert: „Man darf in keinem Fall eine Handlung als die Folge eines höheren psychischen Vermögens interpretieren, wenn sie als diejenige einer niedriger (bei psychologischer Skala) stehenden interpretiert werden kann."

Diese Regel ist sehr wichtig, darf aber nur mit Vorsicht angewandt werden. Wesley Mills bekämpft dieselbe, da sie die Gefahr birgt zu allzu simplistischen Erklärungen zu gelangen und die bisweilen recht komplexe Wirklichkeit zu übersehen. Ein anderer möglicher Einwand ist, daß es oft schwer ist zu entscheiden, ob eine Fähigkeit höher steht als eine andere; es ist auch schwer zu entscheiden, ob gewisse Prozesse für die Natur ökonomischer sind als andere. Ist zum Beispiel eine vererbte oder instinktive Handlung mehr oder weniger ökonomisch als eine erworbene oder eine nachahmende Handlung?

Wenn man zu entscheiden versucht, welche psychologische „Höhe" oder welcher psychologische „Grad" einer gewissen geistigen Funktion zugeschrieben werden kann, so bedeutet es, daß man die Psyche des Tieres mit derjenigen des Menschen vergleicht. Ein solcher Vergleich ist natürlich berechtigt, wenn es sich darum handelt die Unterschiede zwischen der Tier- und Menschenpsyche festzustellen, oder die Phasen der geistigen Evolution zu untersuchen. Aber aus der Notwendigkeit in diesen Fällen den Geist des Tieres nach einem menschlichen Maßstabe zu messen darf durchaus nicht geschlossen werden, daß die Tierpsyche einer unvollständigen Menschenpsyche entspricht. Vom biologischen Standpunkt aus handelt es sich nicht um eine niedrigere, sondern um eine andere Psyche. Die Tierpsyche ist an und für sich betrachtet vollständig, und ihren eigenen Funktionen gut angepaßt.

3. Die funktionelle Frage. Betrachtet man die Tierpsyche für sich allein und nicht in bezug auf den Menschen, so wird man bei der Deutung eines geistigen Vorganges nicht länger nach dem „Grade" fragen, sondern nach der Rolle, den es in der Gesamtheit des geistigen Lebens dieses Tieres spielt. Wenn man die Tierpsyche von diesem Gesichtspunkte aus betrachtet, so wird es vielleicht gelingen die Formel der verschiedenen in der Animalität vorkommenden psychischen Typen aufzustellen; ähnlich will v. Uexküll in seiner „Umwelt und Innenwelt der Tiere" 1909 die anthropozentrische Betrachtungsweise durch den Standpunkt des Tieres ersetzen. Das Problem der geistigen Evolution wird darin bestehen, zu untersuchen, aus welchen Gründen ein gegebener psychischer Typus in bestimmten Momenten nicht mehr fähig war, die Existenz gewisser Tiere zu sichern und auf welche Weise diese psychische Gesamtheit sich in eine andere geeignetere psychische Gesamtheit verwandelte.

6. Formen des tierischen Verhaltens. Ein Tier handelt je nach den Verhältnissen, in denen es sich befindet verschieden, und in normalen Verhältnissen ist sein Verhalten seinen Bedürfnissen angepaßt. Leben bedeutet in der Tat für ein Tier in jedem Augenblicke so handeln, daß die Integrität seines Organismus sowie der Tierart, zu der es gehört, gesichert sei. Man kann sich nicht eine Lebewesenart vorstellen, die in einer für sie schädlichen Weise handelt, denn eine solche Species würde sogleich verschwinden. Die Tatsache, daß jedes Tier in jedem Augenblick in der Richtung seines größten Nutzens handelt, ist eine biologisch so wichtige, daß man dieselbe als das „Gesetz des augenblicklichen Interesses" bezeichnen könnte. In jedem Augenblicke ist es das dringendste Bedürfnis, das die Handlung befiehlt. Dieses Bedürfnis sucht sich zu befriedigen und diese Neigung heißt Trieb.

Das durch diesen bedingte Verhalten kann dreierlei sein: bald setzt der Trieb angeborene physiologische Mechanismen in Bewegung, das ist der Instinkt, bald assoziative individuell erworbene Mechanismen, das ist die assoziative Erfahrung (Sinneserfahrung, Gewohnheit); bald löst er komplexere Prozesse aus, dank denen das Individuum die Art und Weise findet, wie sich in den neuen Verhältnissen zu verhalten, dies ist die eigentliche Intelligenz. Die Biologen und Psychologen sind uneinig in bezug auf die gegenseitigen Beziehungen dieser drei Kategorien des Verhaltens. Während die einen den Instinkt und die Sinneserfahrung, die sie gänzlich von der Intelligenz unterscheiden, durcheinander werfen, machen die anderen zwischen Intelligenz und Sinneserfahrung keinen Unterschied. Aber, wenn auch der Instinkt und die Sinneserfahrung sich darin ähnlich sind, daß beide Automatismen sind, so weichen sie doch durch ihren Ursprung voneinander ab (der eine ist ererbt, die andere ist erworben). Wenn nun andererseits die Sinneserfahrung und die Intelligenz einander darin gleichen, daß beide invividuelle Erlebnisse voraussetzen, so unterscheiden sie sich jedoch dadurch, daß die eine nur eine Wiederholung der Vergangenheit, während die andere eine Entdeckung des Neuen ist.

7. Der Instinkt. Man bezeichnet als instinktive Reaktionen die äußeren angepaßten ererbten Reaktionen, die, ohne erlernt zu sein, von allen Individuen der gleichen Tierart in gleicher Weise ausgeführt werden. Diese Reaktionen werden in zwei Gruppen eingeteilt, je nach dem sie partielle oder globale sind. Im ersten Fall nennt man sie Reflexe, im zweiten Instinkte. Der Begriff des Instinkts ist ein biologischer Begriff. Vom physiologischen Standpunkte aus sind die Instinkte nur zusammengesetzte Reflexe. Die verschiedenen Autoren weichen in der Benutzung dieser Termini voneinander ab; einige weigern sich die Bezeichnung Instinkt bei den Tieren anzuwenden, die kein Nervensystem besitzen. Aber diese Einschränkung ist ganz und gar willkürlich.

Es ist Szymanski gelungen ein instinktives angeborenes Benehmen (das Liebesspiel bei der Weinbergsschnecke) in eine Reihe von Reflexen zu zerlegen und diese Reflexe bei nichtspielenden Tieren und außer der Begattungszeit künstlich zu erzeugen (Pflügers Arch. Bd. 149, 1913).

Psychologisch unterscheidet sich der Instinkt vom Reflex dadurch, daß er mehr bewußt ist. Die reinen Reflexe (z. B. der Pupillenreflex) sind gänzlich unbewußt. Beim Instinkt empfindet hingegen das Tier ein Bedürfnis, das genügend stark ist um die Gesamttätigkeit auf die Befriedigung desselben zu konzentrieren. Zwischen diesen beiden Extremen trifft man alle Zwischenstufen. Diese Teilnahme der instinktiven Handlung am geistigen Leben bewirkt, daß dieselbe durch die augenblicklichen Verhältnisse leichter beeinflußbar wird; hingegen vollzieht sich der Reflex unvermeidlich, welcher Art auch die äußeren Verhältnisse sein mögen. Das Bedürfnis, das den Instinkt begleitet und der physiologische Zustand als dessen Ausdruck er betrachtet werden kann, bilden zweifellos den zur Koordination der verschiedenen Reflexe notwendigen Faktor. — Der Instinkt unterscheidet sich von der Intelligenz dadurch, daß das Individuum sich weder des Zieles seiner Handlung noch der Beziehung zwischen dem Ziele und den zur Erreichung desselben angewandten Mitteln bewußt ist.

In bezug auf die Instinkte ist die wichtigste Frage diejenige nach ihrem Ursprung. Diese Frage ist so schwer zu beantworten, daß gewisse Autoren, wie Condillac, es vorgezogen haben, den Instinkt zu leugnen und seine verschiedenen Aeußerungen durch die Intelligenz zu erklären.

Die Hypothese, daß die Instinkte als eine intelligente Reflexion der Tiere aufzufassen seien, muß zurückgewiesen werden: in der Tat sind ihre Instinkte so wunderbar, daß, wenn sie dieselben durch ihren Verstand vollbringen würden, wie Descartes es bemerkt, die Tiere in allen Dingen viel verständiger sein müßten als der Mensch; dies ist jedoch nicht der Fall.

Die Instinkte werden heute als ererbte Mechanismen aufgefaßt, und es fragt sich auf welche Weise diese Mechanismen durch die Gattung erworben worden sind.

Sehen wir von den Doktrinen ab, die den Instinkt durch ein göttliches Eingreifen erklären (Reimarus, Wasmann) oder als den Ausdruck einer spezifischen ursprünglichen Intuition (v. Hartmann, Bergson) auffassen, so stehen wir zwei großen Theorien

gegenüber, der Lamarckschen, die die Instinkte als vererbte Gewohnheiten betrachtet und der Neo-Darwinistischen, die sie als zufällige durch Selektion begünstigste nützliche Variationen auffaßt. Es ist einstweilen schwer zu entscheiden, welche von diesen beiden Theorien den Sieg davontragen wird. Beide sind stark durch die Kritik, die sie aneinander üben, aber weniger durch ihre eigenen Erklärungsmittel. Darwin selbst nahm gleichzeitig die beiden Faktoren der Vererbung der erworbenen Eigenschaften und der Selektion zufälligen Variationen an.

Die Lamarcksche Theorie, die bereits vor Lamarck durch Leroy vertreten wurde und später durch Spencer, Wundt, Hering, Semon usw. verteidigt wurde, weist zwei Schwierigkeiten auf: 1. Falls die Instinkte von den Vorfahren erworbene, durch Vererbung angehäufte und verstärkte Gewohnheiten sind, so fragt sich, wie jene Gewohnheiten entstanden sind. Sind es automatisch gewordene ursprünglich intelligente Handlungen (Theorie der „lapsed intelligence" von Lewes)? Aber wie soll man bei den niederen Tieren eine so große Intelligenz vermuten, wie sie nötig wäre, um die technischen Prozesse zu erfinden, sowie die Vorsorge, die das Eigentümliche der meisten Instinkte sind? Man müßte also annehmen, daß diese ersten Gewohnheiten zufällig, durch assoziative Erfahrung angenommen wurden; aber wie kann man voraussetzen, daß der Zufall eine so große Anzahl von Wundern hervorgerufen haben soll? Uebrigens kann man da nicht begreifen, daß gewisse Handlungen, die nur einmal im Leben des Individuums vollzogen werden (wie z. B. der Hochzeitsflug der Bienen), zu einer Gewohnheit werden konnten.

2. Eine zweite Schwierigkeit dieser Hypothese bietet der Mechanismus, durch den die erworbenen Gewohnheiten vererbt werden. Die Gewohnheiten bestehen in einer Aenderung des Nervensystems, des Somas; auf welche Weise geht diese Veränderung auf das Keimplasma über, von dem die Bildung der folgenden Generation abhängt? Dies bleibt unaufgeklärt. Die erfinderischen Erklärungen von Semon (Die Mneme 1904) haben es nicht vermocht, völlige Klarheit zu schaffen.

Die Neo-Darwinistische Theorie (Weismann, Ziegler), wenngleich sie nicht die Einwände hervorruft, die wir soeben besprochen haben, bietet ihrerseits eine andere Schwierigkeit: Falls die Instinkte durch vererbte und ausgewählte Reaktionen entstanden sind, die zufällig unter dem Einfluß allgemeiner direkt auf das Keimplasma einwirkenden Ursachen (Klima, Lebensweise usw.) ausgelöst wurden, so haben sich diese Reaktionen nur durch Zufall für das Individuum oder die Gattung nützlich erweisen können. Aber wie konnte der Zufall so gut geordnete Reaktionen hervorbringen wie diejenigen, die die Instinkte bilden?

Es ist zu empfehlen, anstatt diese Theorien zu diskutieren, Tatsachen zu sammeln, um vor allen Dingen zu erfahren, ob die Vererbung einer erworbenen Gewohnheit möglich sei. Zu dem Zweck müßte man experimentell vorgehen, indem man z. B. durch Dressur gewisse Tiere veranlaßt eine Gewohnheit anzunehmen und indem man beobachtet, ob diese Gewohnheit sich auf die Nachkommenschaft dieser Tiere vererbt. Da nun aber ein solches Experiment zahlreiche Generationen der untersuchten Tiere und auch mehrere Generationen von Beobachtern verlangen würde, so könnte man das Experiment in folgender Weise abkürzen: Gesetzt ein Tier wäre dressiert ein Labyrinth zu durchlaufen, so könnte man mit Hilfe der „Ersparnismethode", die von den Psychologen zur Untersuchung des Gedächtnisses angewandt wird, untersuchen, ob die Nachkommen des in Frage kommenden Tieres kürzere Zeit brauchen, um das Durchlaufen des Labyrinths zu erlernen. Falls eine solche Zeitersparnis systematisch in einer großen Anzahl von Fällen beobachtet werden könnte, so würde sich hieraus die Möglichkeit einer Vererbung erworbener Gewohnheiten ergeben (darüber vgl. meinen Aufsatz in Arch. des sc. phys. et nat. Genf April 1909).

8. **Die Intelligenz.** Sind die Tiere intelligent? Diese Frage ist in sehr verschiedener Weise beantwortet worden, sei es, weil man über das Wort „Intelligenz" nicht einig ist, sei es, weil man in der Deutung der Tatsachen nicht übereinstimmt.

In welchem Falle muß ein Lebewesen von der Intelligenz Gebrauch machen? In dem Falle, daß ihm zur Vollziehung der Handlung weder der Instinkt, noch die assoziative Erfahrung einen passenden Automatismus liefern. Es muß folglich diese Mittel entdecken, und um sie zu entdecken, muß es sie suchen. Dieses Suchen ist ein neuer Trieb, der entsteht, wenn die anderen Triebe keine gebahnten Wege finden, sich zu befriedigen. Dieser Suchetrieb ist ein sekundärer Trieb, in dem Sinne, daß er nur als Vermittler eingreift, um die Befriedigung dieser fundamentalen Triebe zu ermöglichen; man könnte ihn als Hilfstrieb bezeichnen. Dieser Hilfstrieb besteht darin, beim Tiere eine Menge Suchereaktionen hervorzurufen, bis die entsprechende Reaktion gefunden sei. Jennings hat bereits bei den Protozoen ein ähnliches Verhalten gefunden, das er als „die Methode des Versuchs und Irrtums" bezeichnet hat. Zur Strassen hat den ausdrucksvollen Namen „Prinzip der Schrotflinte" dieser „Ueberproduktion von Möglichkeiten" gegeben, die das Tier verwirklicht, sobald es sich einer bestimmten Situation gegenüber als unangepaßt erweist.

Aber dieses Suchen kann auf zwei ganz verschiedene Arten geschehen: bald ist es ein bloßes unsystematisches Herumtasten, bald ist es im Gegenteil ein planmäßiges Suchen, das durch die Vor-

stellung des zu erreichenden Zieles reguliert wird, es ist vernunftmäßig. Muß man nun diesen beiden Fällen die Bezeichnung „Intelligenz" beilegen? Oder muß diese Bezeichnung nur auf das planmäßige Suchen beschränkt werden? Diese terminologische Frage ist schwer zu entscheiden. Die beiden Fälle haben einen gemeinsamen Ursprung: beide sind der Versuch einer individuellen Lösung eines neues Problems, aber sie unterscheiden sich stark voneinander durch die Ausführung, die in dem einen Falle planmäßig ist, in dem anderen Falle nicht. Je nachdem also das Wort Intelligenz sich auf den Ursprung oder die Ausführung bezieht, werden diese beiden Prozesse dieselbe Bezeichnung verdienen oder nicht. — Wir wollen die nichtplanmäßige Intelligenz empirische, und die planmäßige vernünftige nennen.

Das einfache nichtplanmäßige Herumsuchen ist für die Handlungen der Tiere von der obersten bis zur untersten Stufe hinab charakteristisch. Auf diese Weise lösen die Tiere die obengenannten experimentellen Aufgaben des Labyrinths, des Vexierkastens u. a. Unter den im Ueberfluß vollzogenen Bewegungen werden die zur Befriedigung des Triebes ungeeigneten eingestellt und hierauf ausgeschaltet, die anderen hingegen werden verstärkt und hierauf fixiert. Es ist ein ähnlicher Prozeß, wie der beim Menschen, der das Schlittschuhlaufen oder das Radfahren erlernt. Diese Auswahl der nützlichen Reaktionen geschieht bald durch die unmittelbare Wirkung des äußeren Mediums (wie in dem Falle des Labyrinths), bald durch Vermittelung der bereits vorhandenen Instinkte, die eine Auswahl treffen (so wird z. B. ein Tier das eine warme Gegend sucht, durch instinktive Rückstoßreaktionen von den kälteren Gegenden entfernt), oder auch durch instinktive Nachahmung.

Das planmäßige Suchen ist für das menschliche Denken charakteristisch. Das logische Denken vollzieht sich ebenfalls durch Versuche und Irrtümer, aber diese Versuche sind der klaren Vorstellung des zu lösenden Problems untergeordnet; übrigens werden diese Versuche gewöhnlich nicht auf materielle Art in der objektiven Welt ausgeführt, aber bloß in idealer Weise in der Vorstellungswelt. Diese innere und symbolische Art ein Handlungsproblem zu lösen, ist das Denken.

Existiert dieses Denken bei den Tieren? Locke, Leibniz, Bonnet leugneten es und die Mehrzahl der heutigen Tierpsychologen gibt auf diese Frage eine verneinende Antwort. Nichts beweist in den zahlreichen Versuchen der letzten Jahre, daß die Tiere systematisch, logisch zu denken vermögen, im Gegenteil spricht alles gegen eine solche Hypothese. Die Versuche der amerikanischen Tierpsychologen, die Experimente von Franken am Hunde usw. beweisen die Unfähigkeit des Tieres, seine Handlungen systematisch zu verbinden und die genauen Beziehungen zwischen den Dingen zu unterscheiden. Uebrigens ist es nicht unmöglich, daß in bezug auf die Intelligenz die höheren Tiere bisher uns wenig bekannte individuelle Unterschiede aufweisen, daß bei einigen bisweilen „Vernunftblitze" auftreten, wie sich Hachet-Souplet ausdrückt, der als Beispiel einen Affen anführt, der sich einen Zahnstocher durch Schleifen eines Eisenstiels an einem Stein anfertigte. Vielleicht besitzen auch die höheren Säugetiere im Keime eine Fähigkeit zu analysieren und zu überlegen, eine Fähigkeit, die durch die Erziehung entwickelt werden konnte. Von dieser Hypothese ausgehend hat von Osten seinen berühmten „klugen Hans" erzogen und neuerdings hat K. Krall in Elberfeld das Unterrichten mehrerer Pferde vorgenommen. Aber Pfungst hat gezeigt, daß der „kluge Hans" in Wahrheit den sehr feinen „ unwillkürlichen Bewegungen" der ihn befragenden Personen gehorchte und daß infolgedessen sein Wissen sowie sein Verstand nur illusorisch wären. Doch scheint die Hypothese von Pfungst ungenügend, um alle bei den Elberfelder Pferden beobachteten Tatsachen erklaren zu können. Darüber vgl. die Arbeiten von Sarasin, Zool. Anz. 1912; Claparède, Arch. de Psych. 12 1912; H. E. Ziegler, Deutsche Revue 1912; Assagioli, Psyche 1912; Mackenzie, Riv. di Psicol. 1912; v. Buttel-Reepen, L. Plate, Naturwiss. Woch. 1913.

Welche Beziehung besteht zwischen dem Instinkt und der Intelligenz? Geht eines aus dem anderen hervor, oder sind sie wesentlich verschieden? In diesem Punkte gehen die Meinungen scharf auseinander. Gewisse Biologen betrachten die Intelligenz als eine einfache Entwickelung des Instinkts. Diese Anschauung ist vielleicht die Folge einer Verwechselung von Instinkt und Trieb. Der Trieb ist ohne Zweifel in den intelligenten Handlungen, deren Triebfeder er ist, vorhanden. Aber der Instinkt selbst ist in seinen Aeußerungen von der Intelligenz völlig verschieden; ihre Richtungen sind entgegengesetzt: der Instinkt neigt zu einem stereotypen Verhalten des Tieres, die Intelligenz hingegen ist ein Prinzip der Plastizität des Verhaltens. Es ist wahr, daß der Instinkt durch die Erfahrung abgeändert werden kann, aber die Intelligenz durchdringt nur den Instinkt, indem sie ihn zerstört.

Man könnte jedoch die Intelligenz selbst als eine besondere Art von Instinkt betrachten: wenn auch der Mensch denkt, so weiß er nicht, wie er es anstellt, um zu denken (die Psychologen haben große Mühe, den Mechanismus des Denkens zu entdecken); man kann also die Tatsache, sich des Denkens zu bedienen, als etwas Instinktives auffassen; der Mensch entdeckt durch das Denken, aber er entdeckt nicht das Denken selbst, noch die Mittel, sich dessen zu bedienen. Die Denkfunktion ist ihm durch Vererbung gegeben, und man kann also bis zu einem gewissen Grade diese denkende Tätigkeit mit den anderen instinktiven angefaßten Tätigkeiten vergleichen.

Existiert nun zwischen der assoziativen Erfahrung und dem vernünftigen Denken einfache Kontinuität, ein bloß quantitativer Unterschied? Die Assoziationspsychologie nimmt es an. Es ist immerhin schwer zu begreifen, daß infolge einfacher Vermehrung der Assoziationen die spezifischen Prozesse des Denkens, die eine Auswahl der zur Erreichung des verfolgten Zieles passenden Mittel darstellen, entstehen könnten. Diese Auswahl kann nicht durch bloße Assoziation erklärt werden. Die im Geiste gebildeten Assoziationen sind Endprodukte; sie bilden ein notwendiges unersetzliches Material für das Denken, aber dieses Material muß bearbeitet werden. Diese Bearbeitung setzt die Existenz gewisser Beziehungserlebnisse voraus. Man kann sagen, daß der Geist des Tieres sich von dem des Menschen dadurch unterscheidet, daß gewisse Beziehungen, die den Menschen interessieren, für das Tier nicht interessant genug sind, um bei ihm ein Beachtungs- und dann ein Abstraktionsobjekt zu werden und somit fruchtbringende Aehnlichkeitsassoziationen hervorzurufen.

Die folgende Tabelle faßt die vorhergegangenen Betrachtungen zusammen. Zwischen dem nichtplanmäßigen und dem planmäßigen Suchen muß man auch Zwischenstufen voraussetzen.

Ursache der Handlung Grundtriebe			Ursprung und Mechanismus der Handlung		Handlung	
Ernährungstrieb Schutztrieb Geschlechtstrieb	→		ererbte Mechanismen	→	instinktive	
	→		erworbene Assoziationen	→	assoziative Erfahrung	↘ Gewohnheit
	→ Hilfstrieb (Suchen)	nicht-planmäßig	äußere Auswahl (unter dem Drucke der äußeren Verhältnisse)	→	intelligente (empirische)	→ Gewohnheit
		planmäßig	innere Auswahl (unter dem Einfluß der Zielvorstellung)	→	intelligente (vernünftige)	↗ Gewohnheit

9. Die Frage der Tropismen. Es bleibt noch übrig einige Worte über eine Art des Verhaltens zu sagen, die in den letzten Jahren sehr viel studiert und diskutiert worden ist, nämlich über die sogenannten Tropismen. Seit 1888 haben Verworn und Loeb sich bemüht das Verhalten der Tiere auf rein physikalisch-chemische Weise zu erklären und gelangten schließlich zu dem Standpunkte, daß die verschiedenen Bewegungen der Tiere denselben Charakter besitzen, wie die Bewegungen der Pflanzen und in weitem Maße unter dem unmittelbaren Einflusse der äußeren Agentien stehen. Für Loeb ist die Orientierung der Tiere bloß ein einfacher Tropismus: „Die Organismen sind durch die Symmetrieverhältnisse ihres Körpers gezwungen, den letzteren in bestimmter Weise gegen die von einer Kraftquelle ausgehenden Kraftlinien zu orientieren, nämlich so daß symmetrische Punkte der Oberfläche unter gleichem Winkel von den Kraftlinien getroffen werden." So wären für Loeb viele instinktive Handlungen nichts anderes als Spezialfälle der tierischen Tropismen.

Die Tropismen sind Gegenstand zahlreicher Untersuchungen gewesen, und heute wird der Ausdruck Tropismus in verschiedenem Sinne gebraucht; die einen bezeichnen hierdurch bloß die Tatsache des Orientierens eines Tieres gegenüber einer Erregungsquelle (z. B. das Licht im Heliotropismus), die anderen bezeichnen als Tropismus den Mechanismus, durch den diese Orientierung zustande kommt. Es gibt nicht weniger als zwanzig Definitionen des Tropismus.

Nach der Auffassung von Loeb ist das Tier, das den Gegenstand eines Tropismus bildet völlig den äußeren Kräften unterworfen. Dieser Zwang wäre für den Biologen und den Psychologen das Hauptunterscheidungsmerkmal des Tropismus von den anderen Tätigkeitsformen. Wenn das Tier, im Falle des Tropismus, von den äußeren Kräften völlig beherrscht wird, so begreift man nicht, daß das Verhalten dieses Tieres mit seinen Bedürfnissen übereinstimmt. Wir hätten hier somit eine Reihe von Reaktionen, die dem Gesetze des augenblicklichen Interesses nicht unterworfen wären und die infolgedessen keine „Handlungen" wären, wie es auch von Bohn, einem Verteidiger der Tropismen, anerkannt wurde (Congrès de Psych. de Genève 1909).

Falls solche Tropismen existieren, sind sie ohne jedes Interesse für die Psychologie und zwar durchaus nicht, weil solche Tropismen rein physische Erscheinungen wären — wir haben gesehen, daß der Parallelist eine solche mechanische Erklärung eines jeden Verhaltens billigt —

aber weil dieses Verhalten dem Subjekte von außen aufgedrängt würde, ohne daß die dem Subjekte innewohnenden Faktoren bei der Ausführung mithelfen, mit einem Worte dieselbe kontrollieren. Wir haben nun gesehen, daß der psychologische Standpunkt gerade der Standpunkt des Subjekts ist.

Ob das Verhalten wirklich durch einen Tropismus bestimmt ist, ist übrigens sehr fraglich. Es ist nicht zu bezweifeln, daß unter bestimmten Verhaltnissen die Tiere völlig von den äußeren Kräften beherrscht werden; aber es scheint immer nur in künstlichen Verhältnissen, die nicht die des normalen Lebens des Tieres sind, vorzukommen. In den normalen Verhältnissen scheint der Tropismus hingegen durch andere Reaktionsarten, instinktartige, die das Tier gegen diese Tropismen schützen, gemildert zu werden. Eine dieser Reaktionen ist die von Loeb als „Unterschiedsempfindlichkeit" bezeichnete; sie besteht in der Tatsache, daß nicht nur die Richtung des Reizes, sondern auch seine Zunahme oder Abnahme das Tier zur Bewegung veranlaßt. Man hat auch beobachtet, daß der Tropismus von dem physiologischen Zustande des Tieres abhängt; so weisen die Mehrzahl der sogenannten Tropismen eine Beziehung zu dem Interesse des Tieres auf (so sind nach Loeb die jungen Raupen von Porthesia „positiv heliotropisch, solange sie nüchtern sind; dieser positive Heliotropismus führt sie zu den Spitzen der Zweige, wo sie ihre Nahrung finden").

Uebrigens ist die Existenz selbst der Tropismen im Sinne von Loeb noch bestritten. Jennings behauptet, daß die Orientierung eines Tieres gegenüber einer äußeren Kraft nicht das direkte Resultat der Wirkung dieser Kraft ist, aber diese Orientierung ist im Gegenteil nach und nach infolge einer Unmenge kleiner Versuchsbewegungen erworben, die so lange fortdauern, bis das Tier eine günstige Stellung dem Reize gegenüber gefunden hat. Dies ist die „Methode des Versuchs und Irrtums", die wir früher bereits erwähnt haben. Die Anschauung von Jennings wird von einigen (Mast, Yerkes) verteidigt, von anderen angegriffen. Bohn, z. B., behauptet, daß die Versuchsbewegungen von Jennings nichts anderes seien als eine Verbindung der Energie des Tropismus mit der Unterschiedsempfindlichkeit. Aber diese Erklärungsweise läßt mehrere Einzelheiten des Verhaltens der Protozoen, die von Jennings beschrieben worden sind, außer acht (s. Fig. 6). Uebrigens selbst wenn man die Erklärung von Bohn gut heißt, so wird hierdurch die biologische Bedeutung des Prozesses der Probierhandlung, wie sie Jennings auseinandergesetzt, nicht geschmälert.

Bohn möchte allerdings den Tropismus von den anderen Tätigkeiten des Tieres trennen, und zwar aus dem in der Tat wichtigen Grunde, daß, wenn man ein phototropisches Tier zwischen zwei Lichtquellen bringt, es sich weder nach der einen noch nach der anderen Lichtquelle bewegt, sondern eine intermediäre Richtung ergreift. Hingegen, sagt Bohn, wählen die höheren Tiere und der Mensch, wenn sie zwischen zwei sie anziehenden Erregern sich befinden, den einen oder den anderen. — Aber die Verhältnisse, in welchen ein Tier, das der Wirkung zweier Kräfte ausgesetzt ist, eine intermediäre Richtung einnimmt, sind gewöhnlich künstlich erzeugte, d. h. es sind dies Verhältnisse, denen das Tier nicht angepaßt ist.

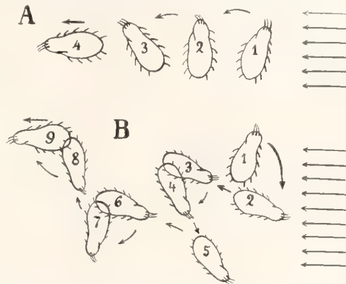


Fig. 6. Schematische Darstellung einer negativen Reaktion eines Infusionstieres gegen einen (von rechts kommenden) Reiz: A Bewegung des Tieres wie sie sein sollte im Falle eines Tropismus im Loebschen Sinne; B Bewegung des Tieres, wie sie tatsächlich ist nach Jennings Beobachtungen. Man sieht, daß das Tier zuerst gegen den Reiz geht, und erst nach einer Reihe von „Versuchen" (von 1 bis 9) sich von dem Reize entfernt.

Ebenso glauben wir, wenn wir am Telephon zuhören, einen Schallboden an jedem Ohr, daß der Ton geradeaus kommt, obgleich er in Wirklichkeit von rechts und links zugleich kommt. Dies könnte auch eine inadäquate Reaktion erzeugen, bei einem Menschen welcher dem Telephon nicht angepaßt wäre.

Kurz zusammengefaßt, entweder existieren die Tropismen im Sinne von Loeb, sind aber durch andere hinzugefügte Arten von Reaktionen neutralisiert, die das Tier von seinen gefährlichen Tropismen befreien; oder, wie es Jennings beschrieben hat, die Tropismen selbst zerfallen in eine Reihe von Reaktionen, die den Reflexen und Instinkten ähnlich sind. Die Zukunft wird entscheiden, welche von den beiden Anschauungen die richtige ist.

10. Die geistige Entwickelung. Obgleich, wie wir gesehen haben (§ 5, 3), die Psyche jedes Tieres seiner Lebensweise vorzüglich angepaßt ist, können wir nicht leugnen, wenn wir die verschiedenen Tierpsychen an sich bedenken, indem wir sie mit der Psyche des Menschen vergleichen, daß sie verschiedene Entwickelungsstufen vorstellen. Die Theorie der Evolution setzt voraus, daß die in der Entwickelung am

meisten vorgeschrittenen Psychen aus niedereren, infolge eines speziellen Entwickelungsprozesses, hervorgegangen sind. Es drängten sich uns also die Fragen auf: wie diese Entwickelung vor sich gegangen ist und welches die Faktoren dieses geistigen Fortschrittes sind; ferner, ob dieser Fortschritt anhaltend oder sprungweise erfolgt ist.

Diese Fragen liegen noch sehr im Dunkeln. Wir beschränken uns hier darauf, zwei Gruppen von Faktoren anzuführen, die den geistigen Fortschritt bedingen: Das Phänomen der Antecipation und das Beziehungsbewußtsein.

1. Die Antecipation. Es ist sicherlich vorteilhaft für ein Tier, wenn es nicht im Augenblick selbst durch die äußeren Faktoren überrascht wird, sondern sich in Hinsicht auf sie vorbereiten kann. So glauben wir, daß die Sinnesorgane (wie das Auge, Ohr) die von einem im Raum noch entfernten Reizmittel warnen, oder die Vorgänge des Gedächtnisses und der Assoziation, die dank der gesammelten Erfahrungen gestatten, sich der Zukunft anzupassen, dem Verhalten sehr günstig waren. Aber wenn wir auch erkennen, wie nützlich die Rolle dieser Phänomene ist, so wissen wir doch nicht, wie sie entstanden sind.

Die Kindheitsperiode und ihre Verlängerung bei den höher entwickelten Tierarten ist auch ein Phänomen der Antecipation, eine Vorübung, die auf die Fähigkeiten vorbereitet, deren das Tier im erwachsenen Stadium bedarf (K. Groos).

Eine der charakteristischen Eigenschaften des höher entwickelten Geistes ist die Fähigkeit, seine Nervenenergie zu konzentrieren, um eine Handlung schnell, genau und wirksam auszuführen. Diese Konzentration ist nur möglich, wenn dem Tiere ein gewisser Vorrat Energie zur Verfügung steht; die Zusammenstellung dieses Vorrates bedingt eine Anhäufung, also eine Ersparnis von Energie während gewisser Augenblicke. Es wäre möglich, daß es unter anderen die Aufgabe des Schlafes ist, diese Anhäufung von Reserveenergie zu veranlassen; demnach wäre also der Schlaf ein Faktor der geistigen Entwickelung (vgl. meine Esquisse d'une théorie biologique du sommeil. Genève 1905).

Das Gehirn, speziell die Hirnrinde, wächst parallel der Entwickelung des Psychismus. Das Gehirn steht sicherlich in Beziehung zu dem Anwachsen des Assoziationsvermögens und der Aufmerksamkeit. Aber wir können nicht wissen, ob die Entwickelung des Hirns selbst die Ursache oder die Folge des Anwachsens dieser Funktionen ist.

2. Das Beziehungsbewußtsein. Das Beziehungsbewußtsein ist auch einer der wichtigsten Faktoren des psychischen Fortschrittes. Beim Instinkt vollzieht sich die Handlung, ohne daß ein Bewußtsein der Beziehungen zwischen der ausgeführten Bewegung und der objektiven Wirkung, die sie veranlaßt hat, noch zwischen dem Reizmittel und der subjektiven Wirkung (Empfindung), die es hervorruft, besteht. Auf einer höheren Entwickelungsstufe, im Gegenteil, werden solche Beziehungen schon dunkel empfunden: so bellt der Hund, damit man ihm eine Tür öffnet, und er läuft beim Anblick einer Peitsche davon. Auf einer noch höheren Stufe sind es nicht nur die Beziehungen zwischen dem Subjekt und einem Objekt, die empfunden werden, sondern auch die zwischen zwei Objekten; dann ist der Geist fähig, den Begriff „Instrument" zu verstehen.

Nach Bergson ist die Fähigkeit unorganische Instrumente zu konstruieren und zu gebrauchen (d. h. andere als die Organe selbst) eine charakteristische Eigenschaft der Intelligenz. — Es scheint, daß der Affe diesen Begriff des Instrumentes schon besitzt. Ich habe einen Affen besessen (Papio Sphinx), der sehr lebhaft war und durchaus nicht leiden konnte, während der Nacht eingeschlossen zu sein. So hatte er sich zur Gewohnheit gemacht, die Tür aus Holz von seinem Käfig abzureißen, deshalb mußte ich sie denn oft wieder annageln, was dem Affen durchaus mißfiel. Und sobald ich mich ihm näherte mit einem Hammer in der Hand, stürzte er sich auf mich und suchte mir den Hammer zu entwinden; es liegt kein Zweifel vor, daß er vollkommen die Beziehung erfaßt hatte, die zwischen dem Hammer und dem Ausbessern seiner Tür bestand. Niemals würde sich ein Hund derartig betragen.

Die weitere Entwickelung des Geistes beruht darauf, daß die verschiedenen Arten von Beziehungen, die zwischen den Gegenständen bestehen können, mehr und mehr erfaßt werden, dann daß sie abstrakt sind, d. h. getrennt durch einen Akt der Aufmerksamkeit von den Gegenständen, die sie bedingen. Welches ist nun der biologische Ursprung und die psychophysiologische Natur dieser Beziehungserlebnisse? Dieser Ursprung ist sehr dunkel; man könnte meinen, daß ihnen Reaktionen oder motorische Einstellungen des Organismus zugrunde liegen; jede Beziehung entspricht einem gewissen Verhalten. Das Beziehungsbewußtsein wäre das Bewußtsein dieses Verhaltens. Aber warum besteht dieses Bewußtsein nur bei den sehr hoch entwickelten Tieren, vielleicht nur allein beim Menschen? Die einzige Antwort, die wir hier geben können, ist, daß die Tiere ihre Aufmerksamkeit nicht auf diese Beziehungsreaktionen gerichtet haben, weil ihnen dies zu ihrer Existenz unnötig war. So sagte schon Ch. Bonnet sehr gut: „Die Tiere haben keine Begriffe; sie verallgemeinern nicht ihre Ideen; ihr Aufmerken beschränkt sich auf den Kreis

ihrer Bedürfnisse“ (Essai anal. sur les facultés de l’âme 1760).

Wir können nur sagen, daß, sobald gewisse Lebewesen infolge einer natürlichen Variation sich dieser Beziehungen bewußt wurden, dieses zum großen Vorteil für sie war.

Die Hand ist sicherlich ein großer Faktor in der Entwickelung des Geistes gewesen, indem sie ihm gestattete, auf feinere Weise zu experimentieren und sich so einer Menge von Beziehungen bewußt zu werden.

Die Abstraktion der Beziehungen ist ein Faktor des ungeheuren innerlichen Fortschrittes, denn sie gestattet dem Geist zu überlegen, d. h. die Folgen einer Menge von Handlungen vorauszusehen, ohne sie erst ausprobieren zu müssen; sie hat auch die Entwickelung der Wortsprache möglich gemacht.

Denken und Sprache, das sind noch neue Arten der Antecipation und der Ersparnis organischer Energie. — Aber wir sind hier schon nicht mehr im Rahmen der Tierpsychologie.

Literatur. *Die im Texte erwähnten Schriften sind hier nicht wiedergegeben.* **Beer, Bethe** und **Uexküll,** *Vorschläge zu einer objektiven Nomenkl. in der Physiologie des Nervensystems. Biol. Centralbl.,* 19, *1899.* — **Boodin,** *Mind as instinct, Psych. Rev.,* 13, *1906.* — **Brehm,** *Tierleben, 4. Aufl., herausgegeben von Zur Strassen. Leipzig 1912.* — **Bohn,** *Die Entstehung des Denkvermögens. Leipzig 1910.* — **Derselbe,** *Die neue Tierpsychologie. Leipzig 1912.* — **v. Buttel-Reepen,** *Die moderne Tierpsychologie. Arch. f. Rassenbiol., 1909.* — **Carus,** *Vergleichende Psychologie. Wien 1866.* — **Claparède,** *Les animaux sont-ils conscients? Rev. philos., 1901.* — **Derselbe,** *La psychologie comparée est-elle légitime? Arch. d. Psychol.,* 5, *1905.* — **Derselbe,** *La faculté d’orientation lointaine. Arch. de Psychol.,* 2, *1903.* — **Derselbe,** *Les tropismes devant la psychologie. Journ. für Psychol. u. Neur.,* 13, *1908.* — **Derselbe,** *La psychologie animale de Ch. Bonnet. Genève 1909.* — **Dahl,** *Die psychischen Vorgänge in den Spinnen, Vierteljahrsschr. wiss. Phil. 1885.* — **Darwin,** *Opera.* — *Discussion sur les Tropismes* (**Bohn, Loeb, Jennings, Piéron, Zur Strassen, Claparède, Pictet, Höffding usw.**), *VIme Congrès internat. de Psychologie. Genève 1909.* — **Driesch,** *Die Seele als elementarer Naturfaktor. Leipzig 1903.* — **Edinger,** *Haben die Fische ein Gedächtnis? Allg. Zeitung, 1899.* — **Edinger** und **Claparède,** *Ueber Tierpsychologie. Leipzig 1909.* — **Ernst,** *Tierpsychologische Beobachtungen und Experimente. Arch. f. ges. Psychol.,* 18, *1910.* — **Ettlinger,** *Sammelberichte über Tierpsychologie. Z. f. Psychol.,* 49, 56, 63. — **Fabre,** *Souvenirs entomologiques,* 10 *vol., 1879 bis 1910.* — **Forel,** *Exp. et remarques critiques sur les sensations des insectes. Riv. di Sc. biolog., 1900 bis 1901.* — **Francé,** *Pflanzenpsychologie. Stuttgart 1909.* — **Franken,** *Instinkt und Intelligenz eines Hundes. Z. f. ang. Psychol.,* 4, *1911.* — **Franz,** *Was ist ein „höherer Organismus“? Biol. Centralbl., 1911.* — **Greppin,** *Naturwissenschaftliche Betrachtungen über die geistigen Fähigkeiten des Menschen und der Tiere. Biol. Centralbl.,* 31, *1911.* — **Groos,** *Die Spiele der Tiere. Jena 1896.* — **Hachet-Souplet,** *Untersuchungen über die Psychologie der Tiere. Leipzig 1909.* — **Herrick,** *The evolution of intelligence and its organs. Science, 1910.* — **Hobbhouse,** *Mind in evolution. London 1910.* — **Holmes,** *The evolution of animal intelligence. N. York 1911.* — **Jennings,** *Behavior of the lower organisms. New York 1906.* — **Derselbe,** *Behavior of the Starfish. Berkeley 1907.* — **Derselbe,** *Diverse ideals and divergent conclusions in the Study of Behavior in lower organisms. Am. J. of Psychol.,* 21, *1910.* — **Derselbe,** *Physical imitations of the activities of amoeba. The Am. Naturalist, 1904.* — **Jordan,** *Einige neuere Arbeiten auf dem Gebiete der „Psychologie“ wirbelloser Tiere. Biol. Centralbl.,* 25, *1905.* — **Krall,** *Denkende Tiere. Leipzig 1912.* — **Lamarck,** *Philosophie zoologique, 1809.* — **Loeb,** *Einleitung in die vergleichende Gehirnphysiologie und vergleichende Psychologie. Leipzig 1899.* — **Lubbock,** *On the senses, instincts and intelligence of animals, 1888.* — **Lukas,** *Psychologie der niedersten Tiere. Wien 1905.* — **Mackenzie,** *A proposito di psicobiologi e di biologi senza psiche, Psiche,* 2, *1913.* — **de Maday-Hentzelt,** *Réflexions sur l’amour maternel. Arch. de Psych.,* 12, *1912.* — **v. Maday,** *Psychologie des Pferdes. Berlin 1912.* — **Derselbe,** *Der Begriff des Triebes. Zentralbl. f. Psychoanal., 1911.* — **Mast,** *Light and the Behavior of organisms. New York 1911.* — **Mills,** *The nature and development of animal intelligence. London 1898.* — **Minkiewicz,** *Versuch einer Analyse des Instinktes nach objektiver vergleichender und experimenteller Methode. Zool. Jahrb., 1909.* — **Morgan,** *Introduction to comparative Psychology. London 1894.* — **Derselbe,** *Habit and Instinct, 1896. (Instinkt und Gewohnheit. Leipzig 1909.)* — **Derselbe,** *Animal behavior. London 1900.* — **Münsterberg,** *Gr. der Psychologie. Leipzig 1900. (Kap. II und XIII.)* — **Nagel,** *Der Lichtsinn augenloser Tiere. Jena 1896.* — **Netter,** *L’homme et l’animal. Paris 1883.* — **Nicolaï,** *Die physiologische Methodik zur Erforschung der Tierpsyche. J. f. Psychol. u. Neur.,* 10, *1907.* — **Nuel,** *La psychologie comparée est-elle légitime? Arch. d. Psychol.,* 5, *1906.* — **Perty,** *Ueber das Seelenleben der Tiere. Heidelberg 1865.* — **Pfungst,** *Das Pferd des Herrn von Osten. Leipzig 1907.* — **Piéron,** *L’évolution de la mémoire. Paris 1910.* — **Reimarus,** *Allgemeine Betrachtungen über die Triebe der Tiere, 1760.* — **Rignano,** *L’évolution du raisonnement, Scientia,* 14, *1913.* — **Romanes,** *Mental evolution. London 1883.* — **G. H. Schneider,** *Der tierische Wille. Leipzig 1880.* — **K. C. Schneider,** *Vorlesungen über Tierpsychologie. Leipzig 1909.* — **Derselbe,** *Tierpsychologisches Praktikum in Dialogform. Leipzig 1912.* — **Semon,** *Die Mneme. Leipzig 1904.* — **Derselbe,** *Das Problem der Vererbung „erworbener Eigenschaften“. Leipzig 1912.* — **Strümpell,** *Die Geisteskräfte der Menschen verglichen mit denen der Tiere. Leipzig 1878.* — **Szymanski,** *Versuch das Verhältnis zwischen modal verschiedenen Reizen in Zahlen auszu-*

drücken. Pflügers Arch., **143**, *1911.* — **Thorndike,** *Animal intelligence, 1898; neue Auflage. New York 1911.* — **v. Uexküll,** *Im Kampf um die Tierseele. Ergebn. d. Physiol., 1902.* — **Verworn,** *Psycho-physiologische Protistenstudien. Jena 1889.* — **Washburn,** *The animal mind. New York 1908.* — **Wasmann,** *Instinkt und Intelligenz im Tierreich. Freiburg 1905.* — **Derselbe,** *Die psychischen Fähigkeiten. Stuttgart 1909.* — **Watson,** *Animal education. Chicago 1903.* — **Derselbe,** *Behavior Monographs, vol.* I—II. *Boston 1911—13.* — **Wundt,** *Menschen- und Tierseele. Leipzig 1863.* — **Yerkes,** *The dancing mouse. New York 1907.* — **Derselbe,** *Animal psychology and criteria of the psychic. J. of Phil., Psychol. and scient. Meth.,* **2**, *1905.* — **Derselbe,** *Scientific method in Animal Psychology. Congrès int. de Psychol. Genève 1909.* — **Yerkes and Watson,** *Methods of studying Vision in Animals. Behav. Monogr., 1911.* — **Ziegler,** *Der Begriff des Instinktes einst und jetzt, 2. Aufl. Jena 1910.* — **Zur Strassen,** *Die neuere Tierpsychologie. Leipzig 1908.*

Edouard Claparède.

Tierstaaten und Tiergesellschaften.

1. Begriffsbestimmungen. 2. Die phyletische Entstehung der Staaten bei den Hymenopteren (Wespen, Hummeln, Ameisen, Trigonen, Bienen). 3. Der Polymorphismus bei den Bienen und den Ameisen. 4. Das psychische Leben bei Bienen und Ameisen. 5. Der Termitenstaat. 6. Verschiedenartige Geselligkeit bei Insekten. 7. Das Gesellschaftsleben bei den Wirbeltieren, hauptsächlich den Vögeln und den Säugetieren: a) Die Fürsorge der Mutter. b) Die monogame Familie. c) Die Formen der sogenannten Polygamie. d) Die Gesellschaftsbildung, welche von der Familienbildung unabhängig ist.

1. Begriffsbestimmungen. Als Tiergesellschaften wollen wir solche Vereinigungen zahlreicher Individuen betrachten, welche auf Geselligkeitstrieben oder sozialen Instinkten beruhen. Den Gegensatz bilden die Tierstöcke (s. d.), bei welchen die Individuen einen körperlichen Zusammenhang haben; sie sind meistens durch Knospung entstanden (z. B. Korallenstock). Vgl. den Artikel „Tierstöcke“.

Wenn wir zahlreiche Individuen einer Tierart beisammen sehen, welche keinen körperlichen Zusammenhang haben, so liegt doch nicht immer eine Tiergesellschaft in dem oben bezeichneten Sinne vor. Die Zusammenkunft kann eine zufällige sein, indem jedes Individuum für sich ohne Beziehung zu den anderen an den Ort gelangt ist; sehen wir z. B. im Mikroskop zahlreiche Wimperinfusorien um eine Luftblase versammelt, so ist diese Vereinigung lediglich dadurch bedingt, daß jedes Tier chemotaktisch von der sauerstoffhaltigen Blase angezogen wird; finden wir am Strande einen Pfahl mit Miesmuscheln bedeckt, so liegt ebenfalls keine soziale Vereinigung vor, denn jede einzelne Muschel hat sich als Larve an dem Pfahl festgesetzt, weil sie von den Strömungen oder Wellen dahin getrieben wurde. Von allen solchen zufälligen Vereinigungen muß hier abgesehen werden.

Wenn aber auf einem Baume mehrere Nester von Saatkrähen sich befinden, so liegt schon eine soziale Gemeinschaft vor, denn diese Vögel sind gesellige Tiere, die nur ungern einsam nisten, vielmehr viele Jahre hindurch an denselben gemeinsamen Brutplätzen festhalten. Eine höhere Stufe des Gesellschaftslebens wird dann erreicht, wenn eine Differenzierung oder Arbeitsteilung eintritt, d. h. wenn einzelne Individuen zum Nutzen der Gemeinschaft gewisse Aufgaben erfüllen; so z. B. wenn bei einer Herde von Pavianen ein starkes Männchen die Führung hat. Wir kommen so zu den Tierstaaten, wie sie bei manchen Insekten sich finden. Es liegt in solchem Falle eine Gemeinschaft zahlreicher Individuen vor, welche durch soziale Instinkte zusammengehalten werden, und unter welchen außer der geschlechtlichen Differenzierung noch eine soziale Differenzierung besteht (vgl. den Artikel „Polymorphismus“); z. B. enthält ein Termitenstaat das Weibchen (Königin), das Männchen (König), zahlreiche Arbeiter und Soldaten. Allerdings sind die Individuen alle gemeinsamer Abstammung (mit Ausnahme des Männchens), so daß man die Gemeinschaft auch als Familie bezeichnen könnte, aber das Wesentliche liegt in dem dauernden Gemeinschaftsleben, welches nur durch das harmonische Zusammenwirken der verschiedenen Kategorien (Kasten) von Individuen möglich ist.

2. Die phyletische Entstehung der Staaten bei den Hymenopteren (Wespen, Hummeln, Ameisen, Trigonen, Bienen). Bei den Aderflüglern kommen sehr merkwürdige Staatenbildungen vor, von denen der Bienenstaat und der Ameisenstaat allgemein bekannt sind. Die staatenbildenden Gattungen und Arten gehören verschiedenen systematischen Abteilungen an, die soziale Lebensweise muß also mehrfach (polyphyletisch) entstanden sein. Aber stets ist die Brutpflege des Weibchens der phylogenetische Ausgangspunkt. Bei einzeln lebenden Bienen oder Wespen fertigt das Weibchen eine Röhre oder einen Bau, um darin die Eier abzulegen; z. B. macht die Mörtelbiene (Chalicodoma muraria Fabr.) einen aus eingespeichelter Erde bestehenden

Bau an einer Steinwand, in welchem eine Anzahl Zellen angebracht sind, deren jede eine gewisse Menge Pollen und Honig und ein Ei aufnimmt; ein anderes Beispiel ist die Sandwespe (Ammophila sabulosa L.), welche ein Loch in die Erde gräbt, eine Raupe hineinbringt, die durch Stiche in das Bauchmark gelähmt ist, und ein Ei dazu legt. Sowohl bei der Mauerbiene als auch bei der Sandwespe bekommt das Weibchen ihre Nachkommenschaft nicht zu Gesicht, denn die Zellen werden alsbald nach der Eiablage verschlossen, womit die Arbeit der Mutter beendet ist.

Bei allen einzeln lebenden Bienen und Wespen ist das Männchen an der Anfertigung der Röhren oder Bauten gar nicht beteiligt. Daraus erklärt sich, daß den Drohnen im Bienenstock und überhaupt allen Männchen sozialer Hymenopteren gar kein Anteil an den Arbeiten des Stockes zukommt; mit der Begattung des Weibchens ist die Aufgabe des Männchens vollendet.

Es ereignet sich bei einzellebenden Bienen häufig, daß zahlreiche Bauten an einem Ort nebeneinanderstehen. Aus diesem zufälligen Zusammenkommen, das durch die günstige Oertlichkeit bedingt ist, kann sich unter Umständen ein gewisser Grad von Geselligkeit entwickeln. Nach Beobachtungen von Friese pflegen[1]) die Pelzbienen (Anthophora parietina Fabr. und andere Arten), wenn ihre Nester in großer Zahl beisammen stehen, die Kolonie gemeinsam zu verteidigen, indem sie in Menge den Angreifer überfallen. Das höhere Staatenleben der Hymenopteren ist aber nicht auf solche gesellige Bauweise gegründet, sondern vielmehr in der Art entstanden, daß ein einziger Bau sich vergrößerte und daß die Nachkommen mit dem mütterlichen Tier sich zu einem Gemeinwesen verbanden.

Bei manchen einzeln lebenden Wespen pflegt das Weibchen dem Ei keine Nahrung beizugeben, sondern die ausschlüpfende Larve zu füttern bis zu der Verpuppung[2]). Ein kleiner Schritt führt nun zur Gesellschaftsbildung: Wenn so viele Zellen gebaut werden, daß die in den ersten Zellen erzogenen Jungen schon ihre Verwandlung beenden, während die Mutter noch mit der Fütterung ihrer jüngeren Geschwister beschäftigt ist, so können die ausschlüpfenden Jungen an ihren Geschwistern ihren Fütterungstrieb betätigen und so der Mutter behilflich sein. Nimmt man an, daß die ersten Jungen nur Weibchen sind und daß sie in ihrer Geschlechtstätigkeit etwas verkümmert sind, so daß sie nur unbefruchtete Eier legen oder sich überhaupt nicht fortpflanzen, so erklären sich die Verhältnisse, welche man bei den Wespen und Hornissen findet: Der Stock wird im Frühjahr von einem einzigen Weibchen begründet, welches schon im vorhergehenden Sommer befruchtet wurde; das Weibchen baut die ersten Zellen und füttert die Larven. Die ersten ausschlüpfenden Tiere sind Arbeiterinnen, d. h. kleinere Weibchen, deren Geschlechtsorgane nicht zur vollen Ausbildung gekommen sind. Diese Arbeiterinnen führen den Bau des Nestes weiter und beteiligen sich an der Fütterung der Jungen. Die Stammutter fährt in der Eiablage fort, so daß zahlreiche Arbeiterinnen entstehen. Im Hochsommer werden dann durch entsprechende Fütterung auch echte Weibchen herangezogen. Ferner legt die Stammutter in manche Zellen unbefruchtete Eier, aus welchen Männchen hervorgehen. Die jungen Weibchen werden befruchtet, wenn sie den Stock verlassen haben; sie schließen sich nicht mehr dem bestehenden Stocke an, sondern verbringen einsam den Winter, um im nächsten Frühjahr je einen neuen Bau zu beginnen. Der alte Bau stirbt im Spätjahr aus.

In ganz ähnlicher Weise verläuft die Staatenbildung bei den meisten Ameisen. Zwar gibt es hier verschiedene Möglichkeiten der Bildung neuer Nester, aber der einfachste und typische Fall ist derjenige, in welchem ein Weibchen allein einen Stock gründet. Dasselbe baut in der Erde eine kleine Kammer in der es sich einschließt um hier einige Larven aufzuziehen, aus denen die ersten Arbeiterinnen des Stockes entstehen. Diese erweitern den Bau und bringen Nahrung herbei, mit welcher das Weibchen und die nun zahlreich vorhandenen Larven ernährt werden. Es entsteht also eine große Menge von Arbeiterinnen. Alle Arbeiterinnen sind flügellos (Fig. 1); ihre Eierstöcke sind verkümmert. Zu bestimmter Zeit, gewöhnlich am Anfang des Sommers werden dann aus befruchteten Eiern Weibchen herangezogen und aus unbefruchteten Eiern Männchen. Diese geflügelten Geschlechtstiere verlassen alle zusammen das Nest an einem Tage oder an wenigen Tagen (Schwarmzeit); sie verteilen sich weithin, wodurch die Wahrscheinlichkeit der Inzucht vermindert wird. Die Weibchen werden befruchtet, werfen dann die Flügel ab und verkriechen sich einsam, wodurch wieder die anfangs besprochene

[1]) H. Friese, Beiträge zur Biologie der solitären Blumenwespen (Apiden). Zoologische Jahrbücher, 5. Bd. 1891; vgl. auch v. Buttel-Reepen, Stammesgesellschaftliche Entstehung des Bienenstaats, Leipzig 1903, S. 18.

[2]) v. Buttel-Reepen (l. c. p. 34) nennt folgende Gattungen und Arten: Cerceris, Bembex rostrata, Bembex spinulae, Lyroda subita, Monedula punctata, Sphex, Mellinus, Crabro quadrimaculatus, Crabro cephalotes.

Gründung eines neuen Nestes ermöglicht wird.

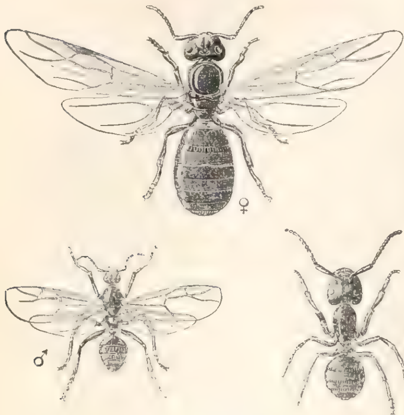


Fig. 1. Weibchen, Männchen und Arbeiterin einer großen einheimischen Ameise Camponotus herculaneus L. Vergrößerung 2. Aus Ziegler, Wörterbuch.

Gehen wir zu den bienenartigen Hymenopteren über, so müssen wir zunächst wieder zu dem oben erwähnten Anfangsstadium zurückkehren, in welchem ein Weibchen eine Anzahl von Zellen baute, jede Zelle mit Honig und Pollen versah und mit einem Ei belegte. Die stachellosen Bienen (Meliponen und Trigonen) haben diese Art der Brutpflege beibehalten; die mit dem Ei belegte Zelle wird abgeschlossen, und die Larve nährt sich von dem in der Zelle beigegebenen Futter. Jedoch bilden diese stachellosen Bienen volkreiche Stöcke, die jeweils einem einzigen Weibchen ihre Gründung verdanken; die ersten ausschlüpfenden Individuen sind Weibchen, die wahrscheinlich nicht befruchtungsfähig sind und vielleicht auch an der Eiablage sich nicht beteiligen; sie bauen aber neue Zellen und bringen Pollen und Honig herbei. Es ist also wahrscheinlich in dem Stock nur ein einziges befruchtetes Weibchen vorhanden wie bei der Honigbiene. Nachdem die Arbeiterinnen in eine Zelle die nötige Menge Blütenstaub und Honig eingetragen haben, legt die Königin das Ei dazu. Die in dem Stock entstehenden Männchen und befruchtungsfähigen Weibchen verlassen den Stock wie es bei den Ameisen geschieht.

Unter den stacheltragenden Bienen sind zunächst die Halictus-Arten zu erwähnen Die Gattung Halictus gehört zwar zu den einzellebenden Bienen, aber man findet bei einigen Arten eine Art der Brutpflege, welche leicht zur Gesellschaftsbildung führen könnte.[1]) Bei Halictus quadricinctus baut die Mutterbiene im Lehmboden einen Schacht von 8 bis 10 cm Länge und an demselben zahlreiche Zellen, die alle mit Honig und Pollen versehen, mit je einem Ei belegt und verschlossen werden. Sie ist noch mit dem Bau von Zellen beschäftigt oder wenigstens noch in dem Bau anwesend[2]), wenn schon aus den ersten Zellen die jungen Tiere hervorkommen. Würden diese letzteren sich an dem Bau beteiligen, so wäre ein derartiges Gesellschaftsleben entstanden, wie es bei den Wespen am Anfang des Sommers besteht.

Auf einer höheren Stufe stehen die Hummeln. Auch hier wird der Bau von einem einzigen Weibchen gegründet. Aber die jungen Tiere, welche zunächst ausschließlich Weibchen sind, treten sozusagen an die Seite der Mutter, so daß ein volkreicher Stock entsteht. — Das Weibchen baut zuerst eine Zelle[3]), trägt Pollen und Honig ein, und legt ein Ei oder (meistens) mehrere Eier hinzu. Ist die Zelle geschlossen, so führt das Weibchen daneben weitere Zellen auf. Insofern ist also ein Unterschied im Vergleich zu den solitären Bienen überhaupt nicht vorhanden. Nun aber öffnet das Weibchen nach einer Reihe von Tagen die erste Zelle ein wenig, bringt den jungen Larven aufs neue Futter, worauf der Behälter wieder geschlossen wird; dies wiederholt sich unter Umständen mehrfach. Hier haben wir also neben der alten von den Vorfahren überkommenen Fütterungsweise den Uebergang zu einer neuen, die dann im Laufe des Sommers zur alleinigen wird. Wächst das Volk stark heran, so tritt die Arbeitsteilung ein: die Königin beschränkt sich fast nur noch auf die Eiablage und fliegt gar nicht mehr aus; die kleinen Weibchen, die sogenannten Arbeiterinnen dagegen übernehmen das Bauen, das Füttern, das Einsammeln der Nahrung, die jetzt durch die vermehrte An-

[1]) Nach Verhoeff und nach v. Buttel-Reepen l. c. S. 21 bis 31.

[2]) Bei manchen Halictus-Arten bewacht das Weibchen den Bau bis zum Ausschlüpfen der Jungen, damit Schmarotzer und Feinde keinen Schaden anrichten können; auch in diesem Falle würde ein Stock entstehen, wenn die Jungen bei der Mutter blieben. Nach v. Buttel-Reepen.

[3]) Die Hummeln besitzen Wachsdrüsen an den ventralen und an den dorsalen Platten der Segmente des Hinterleibes, während die Wachsabscheidung bei den Trigonen und Meliponen auf die dorsale, bei der Honigbiene auf die ventrale Seite beschränkt ist. Dreyling, Ueber die Wachs bereitenden Organe. Zoolog. Anzeiger 1903 u. 1904.

zahl der Kräfte so reichlich zufließt, daß ein Deponieren von Vorrat in die Brutzellen nicht mehr nötig ist[1]).

Die sogenannten Arbeiterinnen der Hummeln sind ihrem innern Bau nach noch vollkommene Weibchen und unterscheiden sich von den richtigen Weibchen nur durch die geringere Größe, die leicht aus der schwächeren Ernährung der Larven erklärt werden kann; sie bleiben aber unbefruchtet, und ihre Tätigkeit kommt nur dem heimatlichen Stock zu gut. Im Hochsommer entstehen dann große Weibchen, welche befruchtet werden, da zu derselben Zeit auch Männchen auftreten, die aus unbefruchteten Eiern der Königin und der Arbeiterinnen hervorgegangen sind. Diese befruchteten Weibchen überwintern und werden im Frühjahr Gründerinnen neuer Stöcke, wie schon oben gesagt wurde.

Bei dem Hummelstaate muß noch bemerkt werden, daß hier auch schon zuweilen ein Honigvorrat eingetragen wird. Bei manchen Arten baut die Königin zu diesem Zweck besondere Zellen, sogenannte Honigtöpfe, bei den meisten Arten wird der Honig in leeren Puppenhüllen (Kokons) aufgestapelt[2]).

Gehen wir von den Hummeln zu den Bienenstaaten über, so sehen wir, daß die Differenzierung zwischen den Weibchen und den Arbeiterinnen deutlicher geworden ist; die Arbeiterinnen sind nicht nur kleiner, sondern auch in bezug auf die Geschlechtsorgane unvollkommener, in anderer Hinsicht aber höher ausgebildet als die Weibchen. Bei der indischen Apis dorsata ist der Größenunterschied noch gering, und die Wabe zeigt also keinen Unterschied zwischen Arbeiterinnenzellen und Weiselzellen. Aber bei der ebenfalls in Indien vorkommenden Apis florea F. sind schon große Weiselzellen vorhanden (Fig. 2); der Verschiedenheit zwischen Arbeiterinnen und Weibchen entspricht eben der Unterschied der Zellen, in welchen sie entstehen. Die Wabe der Apis florea F. hat für die Stammesgeschichte der Honigbiene eine große Wichtigkeit, worauf H. Friese zuerst hingewiesen hat. Sie ist vertikal an einem Aste aufgehangen und zeigt oben eine Anzahl Honigzellen, darunter eine große Menge Zellen für Arbeiterinnen, dann eine Anzahl Drohnenzellen und schließlich am unteren Rande die Weiselzellen (Fig. 2). Da das Leben der Bienen in Indien nicht durch einen Winter unterbrochen wird, so ist hier die Periodizität nicht durch die Jahreszeit, sondern durch den Wabenbau bedingt. Das Bienenvolk kann von Jahr zu Jahr dauernd bestehen bleiben und bald da,

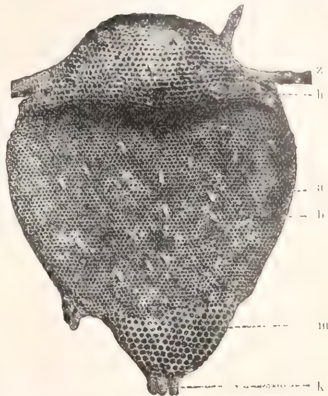


Fig. 2. Wabe von Apis florea an dem Ast eines Baumes. Nach Friese. a Arbeiterinnenzellen, auf denen einige Bienen (b) sitzen, m Drohnenzellen, k Weiselzellen, h Zellen mit Honig, z Zweig.

bald dort eine Wabe bauen. Man kann sich denken, daß die Wabe ursprünglich von einem befruchteten Weibchen gegründet wurde, dem dann die ersten ausschlüpfenden Jungen als Arbeiterinnen zur Seite traten, so daß die Stockbildung ebenso verlief wie bei den Wespen. Mit der Ausbildung der Geschlechtstiere, deren Zellen sich am unteren Ende der Wabe befinden, war dann das Leben auf dieser Wabe abgeschlossen. Wahrscheinlich wird aber der Stock jetzt nicht mehr von einem einsamen Weibchen gegründet, sondern von einem Weibchen, welches von Arbeiterinnen begleitet ist. Dann gestaltet sich das Leben folgendermaßen. Ein Weibchen schlüpft aus einer Weiselzelle aus und gründet in Begleitung eines Schwarmes von Arbeiterinnen eine neue Wabe. Es wird bei einem Ausfluge von einem Männchen befruchtet. Dann werden zuerst zahlreiche Arbeiterinnen erzeugt und schließlich Drohnenzellen und Weiselzellen gebaut. Wenn diese Zellen der Geschlechtstiere mit Eiern besetzt sind, hat die Königin an dieser Wabe ihre Aufgabe erfüllt. Sie kann den Rest der Arbeit (nämlich das Aufziehen der noch vorhandenen Brut) den Arbeiterinnen überlassen und selbst mit einem Teil der Arbeiterinnen abziehen um eine neue Wabe zu gründen. So erklärt

[1]) Nach Hoffer und v. Buttel-Reepen S. 34 und 35.

[2]) Da die Zellen meistens wieder abgetragen werden, wenn die Larven ihre Kokons gesponnen haben, findet man beim Oeffnen eines Hummelnestes gewöhnlich keine Zellen, sondern nur Puppenhüllen.

sich die merkwürdige Tatsache, daß bei unserer Honigbiene bei dem sogenannten Vorschwarm die alte Königin den Bau verläßt.

Wenn auf der Wabe von Apis florea F. eine neue Königin ausschlüpft, so wird sie ebenfalls mit einem Schwarm von Arbeiterinnen abziehen und eine neue Wabe gründen. Die letzte Königin könnte auf der Wabe bleiben und deren Zellen von neuem mit Eiern füllen. Aber es ist wahrscheinlich, daß sie ebenfalls die Wabe verläßt, da in den Tropen die Blütezeit der Pflanzen in den gebirgigen Gegenden auf und ab wandert, so daß die Bienen dementsprechend ihren Wohnsitz verlegen.

Um nun zu unserer **Honigbiene** (Apis mellifica L.) zu gelangen brauchen wir nur die Annahme zu machen, daß der Bau an einen geschützten Ort verlegt wurde, z. B. in einen hohlen Baumstamm, wie dies in einem rauheren Klima nötig war. Wenn der Raum zum Bau einer einzigen großen Wabe zu klein war, so ergab sich der Bau mehrerer hintereinanderstehender Waben, wie wir ihn bei unserer Honigbiene sehen. Mit Rücksicht auf den langen Winter muß eine größere Menge Nahrung eingetragen werden, so daß ein größerer Teil der Waben zur Aufspeicherung des Pollens und des Honigs gebraucht wird; infolgedessen muß die Zahl der Waben sich noch weiter vermehren.

In bezug auf das Schwärmen läßt sich das Verhalten der Honigbienen leicht aus den oben besprochenen Zuständen ableiten. Wenn in den Weiselzellen neue Königinnen entstehen und dadurch in gewissem Sinne ein Abschluß der Brutperiode erreicht ist, verläßt die alte Königin den Stock; zahlreiche Arbeiterinnen begleiten sie, und der so entstehende Schwarm („Vorschwarm“) bezieht eine neue Wohnung, die gewöhnlich von suchenden Bienen („Spurbienen“) irgendwo entdeckt wurde. Kurze Zeit darauf verläßt eine junge Königin ihre Weiselzelle und zieht ebenfalls mit einem Teil der Arbeiterinnen ab (Nachschwarm). Unter Umständen können noch mehrere solche Nachschwärme mit je einer Königin abgehen. Eine junge Königin bleibt im Stock zurück. Sie unternimmt einen Hochzeitsflug, von dem sie in den Stock zurückkehrt, um dann bis zu der nächsten Schwarmzeit dauernd im Stock zu bleiben.

Sind zufällig mehrere Königinnen in einen Schwarm geraten oder sind in dem Stock mehrere Königinnen noch ausgeschlüpft oder zum Ausschlüpfen reif, so werden die überzähligen Königinnen getötet. Dies folgt aus der ganzen Entstehungsgeschichte des Bienenstaats, der ja ursprünglich von einem einzigen Weibchen gegründet wurde und auf allen Stufen seiner phyletischen Entwickelung stets nur eine einzige Königin besaß, welche niemals andere Königinnen in dem Bau duldete.

Der Bienenstaat ist in staunenswerter Weise den Lebensverhältnissen angepaßt. Die Anpassung kann unter dem Einfluß der natürlichen Zuchtwahl entstanden sein. Es fand eine Selektion der Stöcke statt; z. B. vernichtete ein harter und langer Winter alle diejenigen Stöcke, welche den Bau nicht genügend verwahrt hatten oder nicht genug Nahrungsvorrat besaßen.

3. Der Polymorphismus bei den Bienen und den Ameisen. In dem Bienenstocke gibt es bekanntlich dreierlei Individuen, Männchen (Drohnen), Weibchen und Arbeiterinnen; in dem Ameisenstaate drei oder viererlei Individuen, Männchen, Weibchen, Arbeiterinnen und oft noch Soldaten. Wenn man im Ameisenstaate noch die Arbeiterinnen verschiedener Größe unterscheidet, die manchmal verschiedene Aufgaben haben, kann man einen noch viel weitergehenden Polymorphismus feststellen.[1])

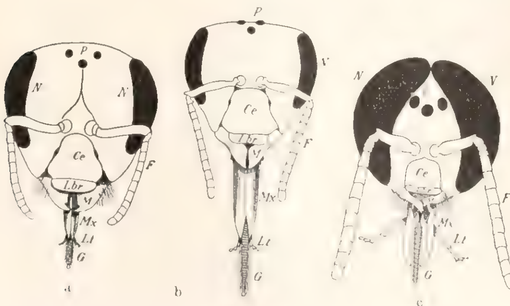


Fig. 3. Köpfe der Königin, der Arbeiterin und der Drohne der Honigbiene. Ce Kopfschild (Clypeus), F Fühler (Antennen), G Zunge, Lbr Oberlippe (Labrum), M Oberkiefer (Mandibeln), Mx Unterkiefer (1. Maxille), Lt Lippentaster (Labialtaster), N Facettenauge, P Punktaugen (Ocellen). Nach Zander.

[1]) Von W. M. Wheeler werden in manchen Ameisenstaaten 27 Formen unterschieden.

Wir betrachten zuerst die Unterschiede zwischen den Geschlechtstieren. Die Männchen sind von den Weibchen nicht allein in bezug auf die Geschlechtsorgane verschieden, sondern auch in der Größe und in der Körperform. Ferner bestehen Verschiedenheiten in der Ausbildung der Sinnesorgane (Fig. 3) und ebenso in dem Bau der Gehirne. Diese Geschlechtsunterschiede bilden keine Besonderheit der sozialen Hymenopteren, da schon bei vielen einzeln lebenden Arten die Männchen durch größere Augen sich auszeichnen und demgemäß auch größere Sehlappen des Gehirns besitzen, die Weibchen aber — sofern sie Bauten machen und deshalb komplizierte Instinkte besitzen — durch besondere Größe des Riechlappens und der pilzförmigen Körper von den Männchen verschieden sind.[1])

Was die Unterschiede zwischen den Weibchen und den Arbeiterinnen betrifft, so sind die Weibchen meistens größer und haben insbesondere einen größeren Hinterleib, da sie ja vollentwickelte Eierstöcke besitzen, während die Eierstöcke der Arbeiterinnen in mancherlei Graden rückgebildet sind.[2]) Was das Gehirn betrifft so ist bei den Wespen das Gehirn des Weibchens größer als dasjenige der Arbeiterin und weist besser entwickelte pilzförmige Körper und größere Riechlappen auf (Fig. 4); man muß sich erinnern, daß die Bildung des Stockes von einem Weibchen ausgeht und daß dieses zu allen Arbeiten befähigt sein muß. Anders liegen die Verhältnisse bei der Honigbiene. Hier hat die Königin die Fähigkeiten des Nestbaus, des Nahrungssammelns und des Fütterns der Brut verloren, und demgemäß ist sie gegenüber der Arbeiterin in mancher Hinsicht rückgebildet oder zurückgeblieben; sie besitzt kürzere Mundwerkzeuge (Fig. 3), entbehrt des Sammelapparates an dem dritten Beinpaar[3]) und weist im Gehirn nur kleine

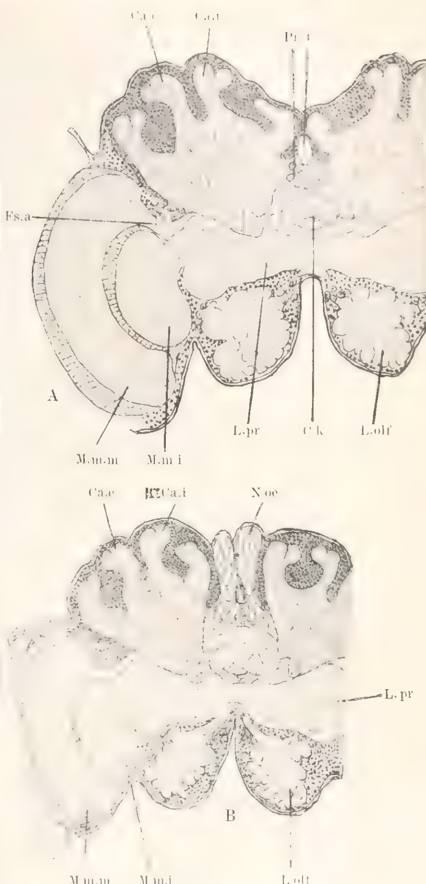


Fig. 4. A und B. Die Gehirne einer Wespe (Vespa vulgaris), Königin (A) und Arbeiterin (B). Ca.e und Ca.i äußerer und innerer Becher des pilzförmigen Körpers, C.k Zentralkörper, Fs.a Augenstrang, L.pr Protocerebralloben, L.olf Riechlappen, M.m.i und M.m.m Fasermassen des Sehlappens, Pi Mittelteil, N.oe Nerven der Punktaugen (Ocellen), T Trachee. Nach H. v. Alten.

Riechlappen und nur kleine pilzförmige Körper auf (Fig. 5), während die Arbeiterin

[1]) Ich verweise auf die Abhandlung von H. von Alten, Zur Phylogenie des Hymenopterengehirns. Jenaische Zeitschrift 46. Bd. 1910 und auf meinen Artikel über die Gehirne der Insekten in der Naturwiss. Wochenschrift N. F. XI. 1912 S. 441.

[2]) Die Arbeiterinnen entstehen aus ebensolchen befruchteten Eiern wie die Weibchen, während die Männchen bei den Bienen und einigen anderen Hymenopteren aus unbefruchteten Eiern hervorgehen; es hängt von dem Futter ab, welches die Larve enthält, ob sie sich zu einem geschlechtsreifen Weibchen oder zu einer Arbeiterin entwickelt. Das Ei ist also zu einer dreifachen Entwickelung befähigt (Drohne, Königin, Arbeiterin); es enthält sozusagen dreierlei Anlagen und die genannten Umstände entscheiden, welche dieser drei Anlagen zur Entwickelung kommt.

[3]) Der Königin fehlt das „Körbchen" an der Schiene; die Bürste, die am ersten Tarsalglied angebracht ist, kommt auch der Königin und der Drohne zu, da sie zum Reinigen des Körpers dient, ist aber bei der Arbeiterin besser ausgebildet.

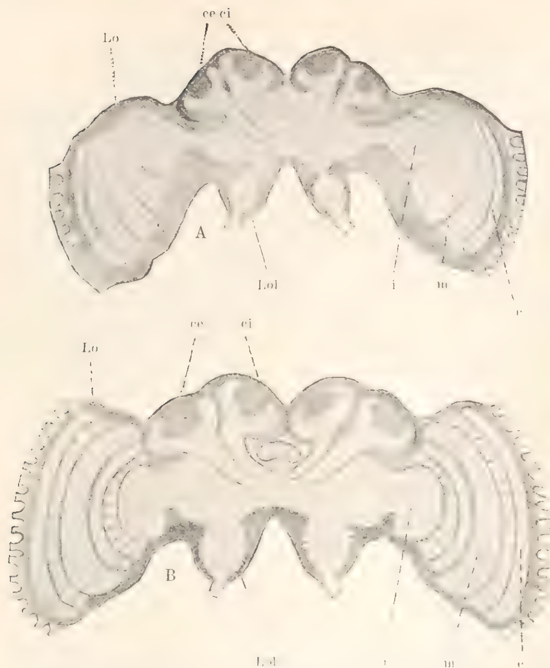


Fig. 5. Die Gehirne der Königin und der Arbeiterin bei der Honigbiene. A Königin. B. Arbeiterin. ce und ci äußerer und innerer Becher der pilzförmigen Körper, Lol Riechlappen, Lo Sehlappen, i m e innere mittlere und äußere Fasermasse desselben. Nach Jonescu.

Dementsprechend sind die Sehlappen des Gehirns am größten bei den Männchen, kleiner bei den Weibchen und noch kleiner bei den Arbeiterinnen; andererseits haben die Arbeiterinnen weitaus die größten Riechlappen und auch die größten Pilzkörper, da das Geruchsvermögen für sie wichtig ist und da sie kompliziertere Instinkte und höhere geistige Fähigkeiten besitzen als die Geschlechtstiere[1]), die an dem Suchen der Nahrung und an den Arbeiten im Stock nicht beteiligt sind.

Bei manchen Ameisen gibt es zweierlei geschlechtslose Tiere, indem außer den Arbeiterinnen noch Soldaten vorkommen. Es sind Individuen mit starken Oberkiefern und entsprechend großem Kopf.

große Riechlappen und große pilzförmige Körper besitzt (man vergleiche Fig. 5, A und B, sowie die Abbildungen der Bienengehirne in dem Art. „Nervensystem", Bd. VII. S. 129). Aber der Stachelapparat ist bei der Arbeiterin kleiner und schwächer als bei der Königin, da er bei letzterer als Legeröhre dient.

Bei den Ameisen sind die Geschlechtstiere geflügelt, die Arbeiterinnen ungeflügelt. Da die Augen für ein fliegendes Tier viel wichtiger sind als für ein am Boden laufendes, haben die Geschlechtstiere große Augen mit zahlreichen Facetten, die Arbeiterinnen kleinere Augen mit geringer Facettenzahl[1]).

Bei der in Mittelamerika lebenden Honigameise (Myrmecocystus mexicanus) kommt eine besondere Art von Arbeiterinnen vor, die sogenannten Honigtöpfe. Diese Ameisenart nährt sich von dem süßen Saft, welchen gewisse Eichengallen während der Entwickelung der Gallwespenlarve ausschwitzen. Damit auch in der übrigen Jahreszeit Nahrung vorhanden ist, wird der Saft in dem Honigmagen (Kropf) einiger Individuen angesammelt, deren Hinterleib infolgedessen kugelig anschwillt (Fig. 6).

4. Das psychische Leben bei Bienen und Ameisen. Früher faßte man die Insektenstaaten nach Analogie der menschlichen Ver-

[1]) Nach Weismann beträgt die Zahl der Facetten bei den Augen des Männchens, des Weibchens und der Arbeiterin bei Solenopsis fugax 400, 200 und 6 bis 9, bei Formica pratensis 1200, 830 und 600, nach Pietschker bei Camponotus ligniperdus 1760, 1250 und 500, bei Stenamma Westwoodi 530, 310 und 75.

[1]) Nach Pietschker verhalten sich die Riechlappen der Masse nach bei dem Männchen, dem Weibchen und der Arbeiterin von Camponotus ligniperdus wie 1 : 3 : 5; die pilzförmigen Körper wie 1 : 4 : 8. Heinrich Pietschker, Das Gehirn der Ameise, Jenaische Zeitschrift 1910.

hältnisse auf; so rühmten viele Schriftsteller bei Bienen und Ameisen die Klugheit, die weise Vorsorge, den Fleiß, die Uneigennützigkeit und Treue gegen die Genossen usw. Den Gegensatz zu einer solchen anthropomorphistischen Darstellung bildet die Behauptung des Physiologen Bethe, daß das Leben der genannten Tiere völlig durch ererbte Reflexe bestimmt sei, so daß von individuellen Erfahrungen oder von einer Einsicht oder Klugheit nicht die Rede sein könne[1]). Diese letztere Auffassung hat sich aber auch nicht als durchführbar erwiesen. Wir sind vielmehr genötigt den Bienen und den Ameisen neben vielen Instinkten und Reflexen auch einen gewissen Grad von Gedächtnis zuzuschreiben, insbesondere ein Ortsgedächtnis. Man muß daher bei den sozialen Insekten wie bei vielen höheren Tieren zwischen instinktiven und verstandesmäßigen Tätigkeiten unterscheiden (vgl. den Artikel „Tierpsychologie").



Fig. 6. Honigtöpfe und Arbeiter in einer Kammer des Baues der Honigameise Myrmecocystus mexicanus. Nach W. M. Wheeler. Aus Göldi, Der Ameisenstaat, Leipzig 1911.

Da für jede Species von einzeln lebenden Bienen eine bestimmte Form und Art des Baues charakteristisch ist und die Bauten der sozialen Hymenopteren aus denen der einzeln lebenden sich entwickelt haben, ist offenbar das Bauen bei allen Bienen eine ererbte, d. h. instinktive Fähigkeit. Es ist also z. B. die doppelseitige Bienenwabe mit den sechsseitigen Zellen, deren zweckmäßige Konstruktion oft gerühmt worden ist, nicht aus der Einsicht der Tiere zu erklären, sondern aus dem Instinkt[1]). Die Bienen haben auch den Trieb, die Ritzen des Behälters, durch die Wind eindringen könnte, mit Wachs zu verstopfen. Die Ameisen besitzen einen ähnlichen Trieb, nasse Stellen im Stock mit trockenen Erdkrümchen zu bedecken; bringt man in einen Ameisenbau ein Uhrglas mit Wasser, in dessen Mitte auf einer Insel Nahrung liegt, so werfen sie aus dem genannten Grunde Erdkrümchen in das Wasser und gelangen dadurch zu der Nahrung, wobei man versucht ist irrtümlicherweise an eine Absicht und ein zweckmäßiges Mittel zu denken. Dieses aus einer Schrift von E. Wasmann entnommene Beispiel zeigt, daß man eine Handlung nicht aus einer verstandesmäßigen Absicht erklären soll, wenn sie auf einen Instinkt zurückgeführt werden kann.

Bei vielen staatenbildenden Insekten besteht der instinktive Trieb, fremde Tiere der eigenen Art zu töten, wenn sie in den Stock geraten. Den Individuen einer Kolonie haftet ein bestimmter Geruch (Nestgeruch) an, und die Eindringlinge werden daran erkannt, daß sie diesen Geruch nicht besitzen.

Auf Instinkten beruht auch die sogenannte Sklavenhaltung bei den Ameisen. Gewisse Arten rauben die Puppen aus den Nestern anderer Arten; die ausschlüpfenden Tiere leben dann in dem Nest der Räuber und verrichten die Arbeiten, die sie auch in ihrem eigenen Nest getan hätten. Diejenigen Ameisenarten, welche solche Sklaven halten, unternehmen zur Erlangung der Puppen große Raubzüge.

So ist auch die merkwürdige Tätigkeit der Blattschneiderameisen (Attiden) lediglich ein Instinkt (Fig. 7 und 8); diese Ameisen schneiden Stücke von Blättern ab, tragen sie in ihren Bau und kultivieren auf Haufen von Blattstückchen

[1]) Bethe bezeichnet daher die sozialen Insekten lediglich als „Reflexmaschinen". Albrecht Bethe, Dürfen wir Ameisen und Bienen psychische Qualitäten zuschreiben. Archiv f. d. ges. Physiologie, Bd. 70, 1898 und Bd. 79, 1900.

[1]) Wie ich in meiner Schrift über den Begriff des Instinktes (1910) ausgeführt habe, entsprechen die Instinkte der körperlichen Organisation. Das Wachs ist ein Sekret von Hautdrüsen und wird bei den Honigbienen an den Bauchplatten des Hinterleibes ausgeschieden, bei den Meliponen an den Rückenplatten (vgl. S. 206).

das Mycelium eines Pilzes, wodurch sie eine stickstoffhaltige Nahrung gewinnen (vgl. unten einen entsprechenden Instinkt bei Termiten). — Zu den Instinkten gehört ferner das Einsammeln von Körnern, das bei der



Fig. 7. Südamerikanische Blattschneiderameisen (Atta sexdens), welche abgeschnittene Blattstücke in ihre Bauten eintragen. Man sieht die von ringförmigen Wällen umgebenen Eingänge eines Baues. Rechts unten ein Soldat, links unten eine Arbeiterin großer Form. Nach Goeldi.

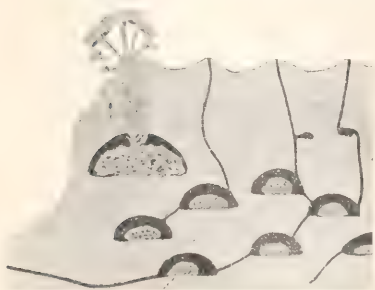


Fig. 8. Schnitt durch einen Bau der Blattschneiderameisen (Attiden). In den Pilzkammern sind die brotleibförmigen Haufen von Blattstücken (die sogenannten Pilzgärten) zu sehen. Oben der Hutpilz, dessen Mycelium in den Pilzgärten gezogen wird. Nach Goeldi.

Gattung Messor und bei einigen anderen Gattungen vorkommt, sowie das Aufsuchen und die Pflege der Blattläuse.

Ein merkwürdiger Instinkt ist auch die Anfertigung von Nestern aus zusammengesponnenen Blättern, wie sie bei einigen indischen Ameisen vorkommt, welche ihre Larven (die Spinndrüsen haben) mit den Kiefern fassen und an den zu vernähenden Blatträndern hin und her bewegen.

Der Sozialismus des Bienen- oder Ameisenstaates ist völlig durch Instinkte bedingt. Jede der drei Formen (Männchen, Weibchen und Arbeiterin) hat ihre besonderen Aufgaben und besitzt eine dementsprechende Organisation; insbesondere hat jede der drei Formen ihren eigenartigen Bau des Gehirns (vgl. den vorigen Abschnitt). — Eine Biene oder Ameise bringt die Nahrung in den Stock[1]) und dient mit jeder ihrer Handlungen nur dem Interesse der sozialen Gemeinschaft. Es würde ihr gegen ihre Natur gehen, anders zu handeln, z. B. die Nahrung für sich bei Seite zu bringen. Es gibt da nur altruistische Triebe, keine egoistischen Regungen. Infolgedessen kann man aus dem Kommunismus der Insektenstaaten keinen Analogieschluß auf menschliche Verhältnisse ziehen.

Als verstandesmäßig dürfen nur solche Vorgänge gelten, bei welchen ein Gedächtnis oder eine individuelle Erfahrung sich zeigt.[2]) Wenn Bienen oder Wespen eine Nahrungsstelle gefunden haben, so fliegen sie immer wieder dahin; die Stelle muß ihnen also in Erinnerung geblieben sein. Die einzelne Biene prägt sich das Aussehen ihres heimatlichen Stockes und die Stellung desselben ein und findet dadurch den Heimweg, wie v. Buttel-Reepen eingehend dargelegt hat. Diese Gedächtniseindrücke müssen körperlicher Art sein,[3]) denn sie können durch Aether, Chloroform oder Bovistdämpfe ausgelöscht werden; auch verschwindet im Falle des Ausschwärmens die Erinnerung an den alten Stock.

Wenn man Bienen künstliche Blumen verschiedener Farben besuchen läßt und in diejenigen einer bestimmten Farbe Honig bringt, so kann man sich leicht überzeugen, daß die Bienen die Blumen dieser Farbe als Honigträger kennen lernen und auch dann noch darin suchen, wenn man den Honig in Blumen einer anderen Farbe getan hat.

Bei den Ameisen kommen bei dem Wegfinden ebenfalls eigenartige Gedächtniseindrücke in Betracht. Allerdings sind manche

[1]) Honig oder süße Säfte werden in dem Kropf oder Honigmagen eingebracht; es ist ein erweiterter Teil des Vorderdarmes, aus welchem der Saft wieder durch den Mund abgegeben werden kann. Man hat ihn zuweilen als sozialen Magen bezeichnet. Die Ameise gibt den Saft ab, wenn sie von einer anderen Ameise in bestimmter Art mit den Fühlern am Kopf beklopft wird.

[2]) Vgl. meine Schrift „Der Begriff des Instinkts usw." 1910 S. 46 und 59.

[3]) Nach meiner Ansicht beruhen sie auf Verbindungen an den Endbäumchen der Dendriten und Neurite (vgl. meine Schrift 2. Aufl. 1910).

Arten (hauptsächlich die blinden Formen) vorzugsweise auf das Verfolgen von Geruchsspuren angewiesen und können auf ihrer eigenen Geruchsspur den Heimweg finden. Aber die sehenden Arten haben eine Kenntnis der nächsten Umgebung des Nestes. Wenn sie weniger auf die Gegenstände als auf die Richtung achten, so entsteht der Anschein eines „Richtungssinnes"[1]. Manche Arten schlagen, wenn sie sich von dem Nest entfernen, eine bestimmte Richtung ein und kehren in dieser Richtung zurück; bringt man sie seitlich aus dieser Richtung heraus, so gehen sie parallel der ursprünglichen Richtung zurück, verfehlen dadurch den Nesteingang und suchen nach demselben, wenn sie eine Strecke zurückgelegt haben, die der Abgangsstrecke an Länge ungefähr gleich ist.[2])

5. Der Termitenstaat. Die Termiten werden oft als weiße Ameisen bezeichnet, da sie in ihrer Lebensweise große Aehnlichkeit mit den Ameisen besitzen. Aber sie gehören einer anderen Ordnung der Insekten an, nämlich den Archipteren; die Aehnlichkeiten beruhen also lediglich auf Konvergenz.

Es gibt in dem Termitenstaat verschiedene Formen von Individuen, welche zuweilen Kasten genannt werden (Fig. 9 bis 11): 1. männliche Geschlechtstiere, 2. weibliche Geschlechtstiere, 3. Arbeiter, manchmal in verschiedenen Größen vorhanden, 4. Soldaten, manchmal in zwei Größen vorhanden (kleine und große Soldaten), seltener in mehreren Formen (Soldaten mit großen Oberkiefern und Nasuti oder zwei, ja selbst drei Formen von Nasuti). Außerdem findet man noch viele Jugendstadien.

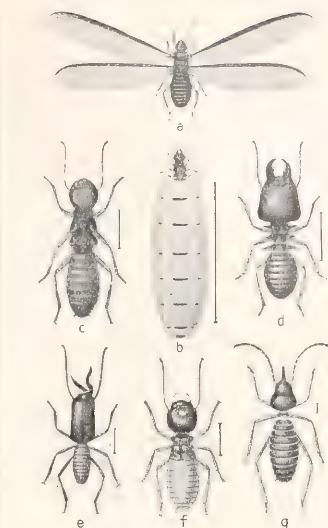


Fig. 9. Die verschiedenen Formen der Individuen im Termitenstaat. a junges Weibchen von Termes spinosus Latr., b erwachsenes Weibchen (Königin) von Termes gilvus Hag., c entflügeltes Männchen (König) von Hodotermes ochraceus Burm., d Soldat von Termes spinosus Latr., e Soldat von Termes speciosus Hav., f Arbeiter von Hodotermes ochraceus Burm., g Soldat (Nasutus) von Eutermes tenuirostris Desn. Die Striche neben den Tieren geben die halbe Länge an. Nach Desneux. Aus Escherich, Die Termiten 1909.

Die Geschlechtstiere sind geflügelt, wenn sie aus dem Bau ausschwärmen, die Arbeiter und Soldaten sind ungeflügelt. Die Gründung eines neuen Stockes geht von einem Pärchen aus, von zwei jungen und noch unreifen Individuen, die sich bei dem Ausschwärmen zusammen gefunden haben. Sie beißen sich die Flügel ab, und es wird ein kleines Nest gegraben, entweder vom Männchen oder vom Weibchen oder von beiden zusammen. Darin eingeschlossen erreichen die Tiere die Geschlechtsreife. Das Weibchen legt einige Eier und erzieht aus den Larven einige Arbeiter, wobei das Männchen auch an der Brutpflege sich beteiligt. Die beiden Geschlechtstiere werden weiterhin von den Arbeitern ernährt, und das Weibchen wächst zu erstaunlicher Größe heran, da sich in seinem Hinterleib die Eierstöcke ausbilden, die auf eine überaus reichliche Fortpflanzung eingerichtet sind. Man findet in dem Termitenbau das Pärchen eingeschlossen in der sogenannten königlichen Kammer, umgeben von zahlreichen Arbeitern, welche die Fütterung und Reinigung der beiden Geschlechtstiere besorgen und die gelegten Eier wegtragen. Auch ein Kranz von Soldaten ist zum Schutz gegen etwaige Angriffe ringsum aufgestellt (Escherich 1909).

Falls die Geschlechtstiere durch irgend-

[1]) Auch beim Menschen kann man diesen Richtungssinn beobachten, wenn Wilde in der Wüste oder im Urwald sich orientieren.

[2]) Ueber das Wegfinden der Ameisen verweise ich auf die Schriften von A. Bethe, Die Heimkehrfähigkeit der Ameisen und Bienen, Biolog. Centralblatt 1902, E. Wasmann, Zum Orientierungsvermögen der Ameisen, Allg. Zeitschr. f. Entomol. 1901; Turner, The homing of ants. Journ. of Comp. Neurology and Psychology 1907; Victor Cornetz, Ueber den Gebrauch des Ausdrucks Tropisch und über den Charakter der Richtungskraft der Ameisen, Arch. f. d. ges. Phys., Bd. 147, 1912.



Fig. 10. Entwickelung von Arbeiter und Soldat von Termes lucifugus. a indifferente Larve (Fühler 11gliedrig), b Larve im II. Stadium (Fühler 12gliedrig), c Larve im III. Stadium (Fühler 14gliedrig), d Arbeiter fertig, e Soldat fertig. Die Striche geben die wirkliche Größe an. Nach Grassi.

oder in der Entwickelung gehemmte Jugendformen aufgefaßt werden, als sie statt 5 nur 4 Häutungen durchmachen und ihre Geschlechtsorgane unentwickelt bleiben. Die Aufgabe der Arbeiter besteht in dem Einsammeln der Nahrung, in dem Bauen der Nester und in der Pflege der beiden Geschlechtstiere und der Larven. Die Soldaten dienen zur Verteidigung des Nestes, zuweilen sind sie auch als Wachen aufgestellt, welche durch Klopfen mit dem Kopfe Alarmzeichen geben. Gewöhnlich sind die Soldaten durch sehr große Oberkiefer ausgezeichnet und haben dementsprechend große Köpfe (Fig. 9d und e und Fig. 10 e). Bei manchen Arten kommen aber Soldaten vor, welche nicht die Oberkiefer, sondern den zugespitzten Kopf als Waffe benutzten, an dessen Spitze eine im Kopf gelegene Giftdrüse ausmündet (Nasentiere, Nasuti) (Fig. 9g).

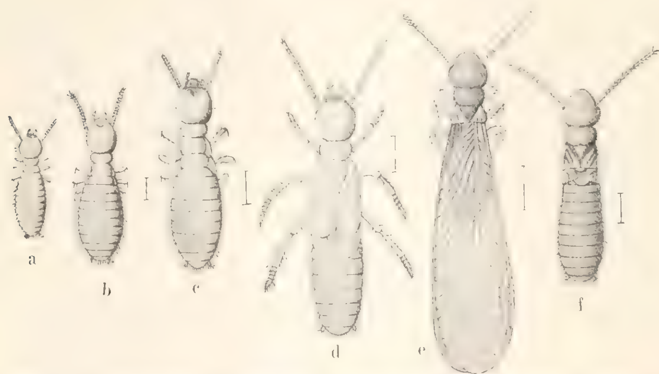


Fig. 11. Entwickelung der geflügelten Geschlechtstiere von Termes lucifugus. a Larve ohne Flügelscheiden, b und c Larven mit kurzen Flügelscheiden, d Nymphe mit langen Flügelscheiden, e Imago, f dieselbe entflügelt. Die Striche geben die wirkliche Größe an. Nach Grassi.

einen Zufall umkommen, können die Arbeiter durch entsprechende Fütterung aus Larven oder Nymphen von Geschlechtstieren oder Larven von Arbeitern (selten von Soldaten), ein neues königliches Paar heranziehen; bei diesen „neotenischen“ Geschlechtstieren (Ersatzkönigen und Ersatzköniginnen) werden niemals Flügel entwickelt.

Die Arbeiter und die Soldaten scheinen beiden Geschlechtern anzugehören[1]). Sie können insofern als unvollkommene Individuen

Die Bauten der Termiten sind überaus mannigfaltig. Da die Termiten sich meistens von Holz nähren, können sie Bäume im Innern aushohlen und große, an den Bäumen hängende Nester anfertigen, welche meistens aus den Exkrementen aufgebaut sind. Manche Arten graben Gänge in der Erde und errichten aus Erde oder aus Holzmehl und Erde pilzförmige

[1]) Man nimmt an, daß es von der Art der Fütterung der Larven abhängt, ob Geschlechtstiere, Arbeiter oder Soldaten entstehen. Bugnion fand aber bei Eutermes lacustris und anderen Arten schon unter frisch ausgeschlüpften Larven Soldaten vor; er vertritt daher die Ansicht, daß die Kasten schon im Ei determiniert sind.

oder turmförmige Bauten, die in einzelnen Fällen eine Höhe von mehr als 6 Metern erreichen können. Das Innere eines solchen Turmbaues ist von einem System von Luftkanälen durchzogen, die kaminförmig nach oben ausmünden (Fig. 12).

Diejenigen Arten, welche diese hohen Bauten errichten, sind meistens Pilzgärtner. Der Bau enthält eine Menge großer Kammern, in deren jeder eine schwammartige Masse zernagten Holzes liegt („Pilzgarten"), welche immer feuchtgehalten wird und auf welcher das Myzel eines Hutpilzes wächst, das unter diesen Umständen kleine weiße Kügelchen erzeugt, in welchen die Larven eine stickstoffhaltige Nahrung finden.

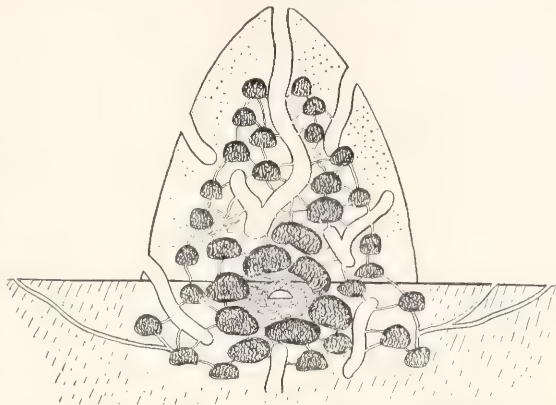


Fig. 12. Schematischer Längsschnitt durch einen Termitenhügel. Man sieht die zahlreichen Pilzkammern mit den Pilzgärten, dazwischen Luftschächte, unten in der Mitte die königliche Kammer; vom unterirdischen Teil des Baues führen schmale Gänge in weiterer Entfernung an die Oberfläche. Nach Escherich.

Die Arbeiter und Soldaten der Termiten sind fast immer blind. Die meisten Arten leben unterirdisch, und kommen nicht an das Tageslicht. Manche Arten bauen gedeckte Galerien und können in solchen z. B. harte Straßen überschreiten oder an festen Mauern heraufkommen. Viele Arten werden dem Menschen sehr lästig, indem sie in Häusern oder Zelten Gegenstände von Holz, Leder oder Tuch von innen heraus zernagen.

Das Leben der Termiten ist durch Instinkte geregelt. Ueber ein Gedächtnis oder irgendwelche verstandesmäßige Fähigkeiten ist nichts Sicheres bekannt.

6. Verschiedenartige Geselligkeit bei Insekten. Manche Ansammlungen von Insekten beruhen nur auf lokaler Vermehrung. Findet man z. B. an einem Aestchen zahlreiche Blattläuse, so ist dies einfach daraus zu erklären, daß die Tiere an dieser Stelle sich stark vermehrt haben; die ganze Kolonie kann von einem einzigen Muttertiere abstammen.

Bei den Raupen mancher Schmetterlinge halten sich die aus einer Eiablage stammenden Tiere noch eine Zeitlang zusammen. So spinnen die Raupen des Goldafters (Porthesia chrysorhoea) ein Nest, in dem sie überwintern. Ein größeres und festeres Gespinst erzeugen die Raupen des Prozessionsspinners[1]; unten hat das Nest eine Oeffnung, aus der die Raupen des Abends in einem Zuge herauskommen, um das Laub der Bäume abzufressen.

Wenn Eintagsfliegen (Ephemeriden) plötzlich in großen Massen erscheinen, so liegt dabei schwerlich eine wirkliche Geselligkeit vor; das massenhafte Auftreten ist vielmehr daraus zu erklären, daß die Larven in großer Zahl im Wasser leben und bei geeigneter Witterung gleichzeitig ihre Metamorphose beenden. — Eher kann man bei den Heuschreckenschwärmen einen sozialen Trieb annehmen; große Mengen junger Tiere schlüpfen nach einem Regen ungefähr gleichzeitig aus den Eiern aus und ziehen in Scharen umher, bis sie am Ende der Metamorphose ihre Flügel erhalten; so entsteht ein fliegender Heuschreckenschwarm, dessen Flugrichtung wahrscheinlich durch den Wind bestimmt wird. — Auch bei denjenigen Mücken mag ein geselliger Trieb bestehen, die manchmal stundenlang an einer sonnigen Stelle auf und ab tanzen. — Merkwürdig sind die Wanderzüge der Larven der Trauer-

[1]) Es kommen mehrere Arten der Gattung Cnethocampa (Thaumatopoea) in Betracht.

mücke Sciara militaris, welche unter dem Namen „Heerwurm" bekannt sind.[1]) Die Weibchen legen die Eier in Haufen abgefallenen Laubes ab; die Larven kommen unter gewissen Umständen in großer Menge aus dem Laubhaufen hervor und bilden einen Wanderzug, der vermutlich eine Stelle geeigneter Feuchtigkeit und Nahrung aufsucht.

7. **Das Gesellschaftsleben bei den Wirbeltieren.** Die verschiedenen Formen des gesellschaftlichen Lebens, welche bei den Wirbeltieren vorkommen, können in einem einzigen Abschnitt besprochen werden. Denn wie alle Wirbeltiere in bezug auf die Grundform des Nervensystems übereinstimmen, so treten auch ähnliche soziale Instinkte in verschiedenen Abteilungen dieses Stammes hervor. Es gilt das vor allem für die höheren Wirbeltiere, für Vögel und Säugetiere, bei welchen sich in paralleler Weise gleichartige Verhältnisse des Familienlebens und der sozialen Gemeinschaften entwickelt haben.

Wir betrachten zuerst die monogame Familie, dann die polygame Familie und dann die Gemeinschaften, welche nicht aus dem Familienzusammenhang hervorgegangen sind. Denn die Gesellschaftsbildung hängt bei den Wirbeltieren in vielen Fällen mit der Familienbildung zusammen, in anderen Fällen ist sie aber davon unabhängig; sie kann zahlreiche Familien umfassen oder erscheint in solchen Lebensperioden, in welchen die Familie gar keine Rolle spielt.

7a) Die Fürsorge der Mutter. Die Familienbildung muß in den meisten Fällen unter dem Gesichtspunkt der Brutpflege betrachtet werden. Die Fürsorge für die Nachkommenschaft ist der biologische Zweck. In der mütterlichen Liebe liegt nach meiner Ansicht der phyletische Ursprung der Liebe überhaupt. Indem diese Gemütsregung auch auf das männliche Geschlecht übergeht, kommt das Männchen zur Fürsorge für die Nachkommenschaft und zu dauerhafteren Beziehungen zu dem Weibchen. Sozusagen als Seitenzweig der Liebe zu den Jungen entwickelt sich die Liebe zwischen den beiden Geschlechtern. Der Begattungstrieb (der viel älter ist) kombiniert sich mit dieser Liebe und wird auf höherer Stufe von ihr abhängig und ihr untergeordnet.

Der Anfang der Familienbildung liegt darin, daß die Jungen nach dem Ausschlüpfen einige Zeit mit der Mutter zusammen bleiben, von ihr beschützt, geführt oder gefüttert werden. Es gibt dafür zahllose Beispiele von Vögeln und Säugetieren.[1])

Unter den Vögeln mögen hier die Hühnervögel genannt werden, bei welchen die Jungen eine Zeitlang von der Henne geführt und beschützt werden. Der Zusammenhalt von Mutter und Kind und das Wiederzusammenfinden bei vorübergehender Trennung wird dadurch erleichtert, daß die Mutter einen Lockton und die Jungen einen Klageton besitzen, wie man das bei jeder führenden Henne beobachten kann.

Bei den Säugetieren ist durch das Säugen selbst die Verbindung von Mutter und Kind zur Notwendigkeit geworden. Bei manchen Säugetieren dauert die Fürsorge der Mutter ungefähr gerade solange als das Junge der Milch bedarf; bei einigen Säugetieren ist die mütterliche Liebe von längerer Dauer. So führen die Dächsin und die Füchsin die Jungen bis zur Herbstzeit; die Füchsin bringt den Jungen Nahrung; z. B. berichtet Brehm von einem Falle, in welchem sie einem gefangenen und angeketteten Jungen einen Truthahn mit abgebissenem Kopf vorlegte.

Bei vielen Huftieren gehen die Jungen mit der Mutter bis sie erwachsen sind. Bei den Affen dauert das zärtliche Verhältnis zwischen der Mutter und den Jungen durch deren ganze Jugendzeit.

7b) Die monogame Familie. Im Vergleich zu der Fürsorge der Mutter steht die monogame Familie auf einer

[1]) Die Larve ist 7 mm lang, von weißlicher Farbe mit schwarzem Kopf.

[1]) Bei den Fischen ist diese Art der Brutpflege selten. Die meisten Fische legen den Laich ab und kümmern sich nicht um die Nachkommenschaft. In einigen Fällen wird der Laich noch bewacht (vom Weibchen oder vom Männchen). Eine höhere Brutpflege kommt nur bei wenigen Arten vor. Von den als Zierfische bekannten Cichliden wird berichtet, daß die Eier in eine Grube abgelegt und durch Fächeln mit den Brustflossen mit frischem Wasser versorgt werden; nach dem Ausschlüpfen der Jungen werden diese eine Zeit lang von den Eltern geführt und am Abend in das Nest zurückgebracht. Bei den Maulbrütern (Paratilapia) nimmt das Weibchen den Laich in das Maul bis die Jungen ausschlüpfen, und führt die Jungen herum, welche bei Gefahr in das Maul zurückflüchten. Bei manchen Arten fällt dieselbe Aufgabe dem Männchen zu. Manche Labyrinthfische (Macropodus viridiauratus u. a.) fertigen an der Oberfläche des Wassers mittels eines speichelartigen Sekretes ein Schaumnest an; dieses nimmt die Eier auf und wird vom Männchen bewacht, welches auch die Jungen, die etwa herausfallen, in das Nest zurückbringt. Bei den Stichlingen (Gasterosteus aculeatus u. a.) baut das Männchen aus Pflanzenteilen mit Hilfe klebriger Fäden (die aus einem Teil der Niere stammen) ein kunstvolles Nest, veranlaßt einige Weibchen die Eier hineinzulegen und bewacht die Eier und die Jungen.

höheren Stufe, da sie durch die Mithilfe des Vaters den Jungen einen kräftigeren und oft auch längeren Schutz gewähren kann. Wir finden daher die monogame Familie hauptsächlich bei solchen Tieren, deren Junge in hilflosem Zustand auf die Welt kommen und einer langen Pflege bedürfen. So ist die Monogamie bei denjenigen Vögeln verbreitet, welche Nesthocker sind. Das Männchen hilft in diesem Fall beim Bau des Nestes, bei der Fütterung der Jungen und bei der Beschützung derselben.[1]) Daraus folgt ein langes Zusammenleben des Männchens mit dem Weibchen, und von da ist nur ein kleiner Schritt zu dem dauernden Zusammenleben. Die meisten monogamen Vögel (Tauben, Störche, Schwalben und viele andere) bleiben, wenn sie sich einmal angepaart haben, in dauernder Einehe beisammen, so daß die Gemeinschaft nur durch den Tod eines Paarlings beendet wird. — Ein zeitweiliges monogames Verhältnis sehen wir beim Rebhuhn, das unter den Hühnervögeln, die in der Regel polygam sind, gewissermaßen eine Ausnahme bildet. Im Frühjahr vereinigt sich ein Männchen mit einem Weibchen, wobei unter den Männchen heftige Kämpfe um den Besitz der Weibchen ausgefochten werden. Das Männchen bleibt bei dem brütenden Weibchen und ist bemüht, dieses und die Jungen zu schützen. Da die Tiere im Winter nicht paarweise leben, sondern zu größeren Scharen sich vereinigen und da im Frühjahr um die Weibchen gekämpft wird, ist es zweifelhaft, ob dieselben Tiere im nächsten Jahre wieder zu einem Paar zusammenkommen.

Unter den Säugetieren finden wir das Zusammenleben eines Paares hauptsächlich bei manchen Raubtieren, manchen Huftieren, manchen Nagetieren und manchen Affen. Bei den Raubtieren und bei den Nagetieren, welche zu gewissen Zeiten paarweise angetroffen werden, ist dieses Zusammenleben meistens nur auf kurze Zeit beschränkt. Jedenfalls ist das Weibchen zur Zeit der Geburt der Jungen allein, und das Männchen wird nicht zu den Jungen zugelassen, da die männlichen Säugetiere oft den neugeborenen Jungen gefährlich sind. Es ist auch zweifelhaft, ob die männlichen Tiere für die Jungen Nahrung herbeibringen, und muß man diesbezügliche Nachrichten mit Vorsicht aufnehmen.[2])

Unter den Nagetieren findet man ein zeitweiliges Zusammenleben der Paare insbesondere häufig bei solchen Arten, welche einen Bau graben, wie z. B. Ziesel, Murmeltiere und Biber; in diesen Fällen ist das Männchen an dieser Arbeit beteiligt oder hält sich wenigstens eine Zeitlang mit dem Weibchen in dem Bau auf.

Von manchen Huftieren wird berichtet, daß sie stets in Paaren leben, so von den kleineren Antilopenarten, z. B. der Duckerantilope (Cephalolophus mergens Wagn.); auch der südamerikanische Spießhirsch (Cervus rufus Cuv.) wird nie in Rudeln, sondern nur einzeln oder in Paaren getroffen; ebenso das Moschustier (Moschus moschiferus L.).

Ein monogames Verhältnis finden wir ferner bei den anthropoiden Affen und wahrscheinlich auch bei manchen anderen Affen. Zwei Umstände begünstigen hier die Monogamie; erstens die Tatsache, daß die Begattungszeit nicht auf eine bestimmte Jahreszeit beschränkt ist und zweitens das langsame Wachstum der Jungen. Die Jungen der großen anthropoiden Affen wachsen ebenso langsam heran wie menschliche Kinder und bedürfen auch so lange Zeit des elterlichen Schutzes. Während dieser Zeit kann wiederum ein Junges geboren werden, oder gar mehrere, und die Familie gewinnt dadurch große Aehnlichkeit mit der menschlichen Familie. Man hat beim Gorilla und beim Schimpanse oft ein Pärchen mit Jungen verschiedenen Alters beobachtet.[1]) Da also schon bei den Affen ein monogames Verhältnis in vielen Fällen besteht, so ist es durchaus unwahrscheinlich, daß der Mensch ursprünglich in Promiskuität gelebt habe, wie dies manche Soziologen glauben.[2])

7c) Die Formen der sogenannten Polygamie. In bezug auf die Fälle, welche als Polygamie aufgefaßt werden, sind ver-

[1]) In manchen Fällen wird das brütende Weibchen von dem Männchen gefüttert, z. B. bei den Nashornvögeln (Buceros).

[2]) Die in manchen Büchern sich findende Angabe, daß der männliche Fuchs mit der Füchsin in dauernder Einehe lebe und daß er den Jungen Futter bringe, wird von Kennern bestritten (Adolf und Karl Müller, Westermanns Monatshefte 1897). Zur Brunstzeit sind zuweilen mehrere Rüden in dem Bau anwesend, aber die säugende Füchsin ist stets allein und sucht das Geheck verborgen zu halten. Nur in dem Falle hat man eine Brutpflege des männlichen Fuchses beobachtet, wenn die Füchsin umgekommen ist und der Fuchs durch das klägliche Bellen der Jungen zum Herbeibringen von Nahrung veranlaßt wird.

[1]) Ich verweise auf Brehms Tierleben und auf die Zusammenstellung in meinem Buche „Die Naturwissenschaft und die sozialdemokratische Theorie" S. 69 bis 86.

[2]) Ich verweise auf die Ausführungen in meinem Buch „Die Naturwissenschaft und die sozialdemokratische Theorie" Stuttgart 1894. Die Lehre von der Promiskuität ist eine theoretische Konstruktion, deren Unhaltbarkeit schon aus der psychologischen Tatsache hervorgeht, daß beim Menschen in beiden Geschlechtern eine starke Eifersucht als ein uralter Trieb vorhanden ist.

schiedene Fälle zu unterscheiden. Unter den Vögeln sehen wir die Polygamie bei den meisten Hühnervögeln; diese sind Nestflüchter, d. h. die Jungen können alsbald nach dem Ausschlüpfen mit der Henne weglaufen und nach kurzer Zeit ihr Futter allein finden. Eine Beteiligung des Hahnes an der Brutpflege ist also nicht nötig und kommt nur in wenigen Fällen vor. Bekannt ist das Verhalten des Haushahns, der das ganze Jahr hindurch bei den Hennen bleibt[1]), sie auch zuweilen zu einem gefundenen Futter herbeiruft und vor allem mit großer Eifersucht jeden anderen Hahn vertreibt. — Aber bei den meisten Hühnervögeln pflegt sich der Hahn nur während der kurzen Fortpflanzungszeit um die Hennen zu kümmern; dies wird z. B. von den Fasanen, von den Truthühnern und vom Auerhuhn und Birkhuhn berichtet. Nachdem der Hahn andere Hähne vertrieben (wobei es oft zu heftigen Kämpfen kommt), und durch ein Bewerbungsspiel (Locken, Balzen, Tanzen) die Aufmerksamkeit und das Wohlgefallen der Weibchen erregt hat, kommt er zur Begattung mit einem oder mehreren Weibchen. Die Brutpflege bleibt aber allein dem Weibchen überlassen.

Ganz ähnlich sind die Verhältnisse bei manchen Huftieren. Bei den Gemsen finden sich die starken Böcke zur Paarungszeit (im November) bei den Rudeln ein, die aus Geißen und jungen Tieren bestehen. Ein Bock duldet keinen Rivalen bei einem Rudel. und es entstehen aus diesem Grunde erbitterte Kämpfe. Wenn die Begattungszeit vorbei ist, kümmert sich der Bock weder um die Geißen noch um die Jungen. Ebenso verhalten sich die Hirsche. Zur Brunstzeit, im Herbst, rufen die starken Hirsche die Rudel der Hirschkühe herbei und kämpfen untereinander um den Besitz des Rudels. In der anderen Jahreszeit leben die Männchen meistens vereinzelt oder zu kleinen Gesellschaften vereinigt, zuweilen auch bei größeren Rudeln, die aus beiden Geschlechtern bestehen.

Beim Reh tritt die Brunst im Juli ein, und kämpfen die Böcke um diese Zeit mit großer Leidenschaft. Nach der Begattungszeit bleibt der Bock mit einer Ricke, seltener mit 2 oder 3 Ricken und ihren Jungen bis zum folgenden Frühjahr zusammen. Es scheint sich hier mehr um einen Geselligkeitstrieb, als um ein Schutzverhältnis zu handeln; denn bei dem Austreten aus dem Wald geht der Bock hinter der Ricke, und bei drohender Gefahr flieht er zuerst. Im Winter sind oft mehrere Familien zu einem Rudel vereinigt.

Eine wirkliche Polygamie scheint bei den Wildpferden und bei verwilderten Pferden vorzukommen. Der Hengst sammelt einige Stuten um sich, die er anführt und von denen er andere Hengste fernhält. In großen Herden sind zahlreiche Hengste mit ihren jeweiligen Gefolgschaften von Stuten vereinigt. Ein ähnliches Verhältnis dürfte bei manchen Affen zu finden sein.

7d) Die Gesellschaftsbildung, welche nicht aus der Familienbildung hervorging. Wir kommen nun zu denjenigen Gesellschaftsbildungen, welche zu der Paarung oder Begattung gar keine Beziehung haben. Viele Fische ziehen in Scharen umher[1]); insbesondere sind die jungen Fische in der Regel zu Scharen vereinigt. Viele Strichvögel sieht man während eines großen Teiles des Jahres in Scharen, z. B. die Goldhähnchen und manche Meisenarten. Selbst die Sperlinge streifen im Spätjahr und im Winter gesellig umher.

Es gibt viele Vögel, welche gesellig leben und gerne ihre Nester beisammen an bestimmten Lieblingsplätzen bauen. Das bekannteste Beispiel bilden die Saatkrähen; ferner sind hier die Fischreiher, die Lummen, die Möven, die Wandertauben, manche Webervögel, manche Kuckucksarten, die Mehlschwalbe, die Uferschwalbe u. a. zu nennen. Es handelt sich in allen diesen Fällen um ein Zusammenleben zahlreicher monogamer Familien, wodurch die Behauptung mancher Soziologen widerlegt wird, daß eine Gesellschaftsbildung nur auf der Grundlage der Promiskuität möglich sei.

In einigen Fällen werden von den beisammen nistenden Paaren gemeinsame Bauten errichtet. Der in Südafrika auf Bäumen nistende Siedelsperling (Philetaerus socius) fertigt ein Nest aus Grashalmen, das oben gedeckt und unten offen ist; die Paare bauen so eng zusammen, daß der Anschein eines einheitlichen Daches entsteht. Bei der folgenden Brütezeit werden die Nester unter die früheren Nester gebaut, so daß das frühere Dach alle beschirmt.

Bei den Madenfressern (Crotophaginae), die in Süd- und Mittelamerika vorkommen, bauen mehrere Weibchen ein gemeinsames

[1]) Man bedenke, daß das Haushuhn aus Ostindien stammt, also aus einem Land, in dem es keinen Winter gibt, so daß die Fortpflanzungszeit über einen großen Teil des Jahres sich erstreckt.

[1]) Während des größten Teiles des Jahres ist diese Zusammenscharung von der Begattung und Fortpflanzung ganz unabhängig; nur während der kurzen Fortpflanzungszeit kümmern sich die Geschlechter umeinander.

Nest, in welchem sie nebeneinander brüten[1]).

Auch bei vielen Säugetieren findet man eine Geselligkeit, welche keine Beziehung zur Paarung hat. Manche Meersäugetiere (Delphine und Wale) schwimmen in Scharen oder in langen Reihen. Die Robben lagern sich gesellig am Strande. Wölfe werden im Winter, Schakale und Hyänen auch zu anderer Zeit in Rudeln angetroffen. Mehrere Arten wilder Hunde jagen in Meuten[2]). Viele Huftiere bilden große Herden.

Die meisten Affen sind gesellige Tiere; sie bilden Scharen, die meistens von einem starken Männchen geführt werden. Da die Männchen sehr eifersüchtig sind, nimmt man an, daß das starke Männchen zu den Weibchen der Schar in einem polygamen Verhältnis steht. Ich halte es aber für wahrscheinlich, daß manchmal mehrere monogame oder polygame Familien in einer Schar vereinigt sind. Es kommen zuweilen große Affenherden vor, welche mehrere ausgewachsene Männchen enthalten, so daß es unwahrscheinlich ist, daß die ganze Gesellschaft nur eine einzige polygame Familie sei. Die Schimpansen leben in monogamen Familien, aber zuweilen sind große Scharen beobachtet worden, die also aus mehreren oder vielen Familien bestehen müssen[3]).

Viele Säugetiere legen gerne ihre Bauten gesellig an, z. B. die Murmeltiere, die Kaninchen, die Ziesel, die sog. Präriehunde (Cynomys ludovicianus Baird), die Wollmäuse (Chinchilla lanigera Benn.), die Viscacha (Lagostomus trichodactylus Brookes) und die Biber. Diese Geselligkeit ist unabhängig von den Paarungsverhältnissen; denn die Kolonien bestehen aus zahlreichen Bauten, in welchen die Tiere einzeln oder (zur Paarungszeit) paarweise wohnen.

Eine höhere Stufe der Geselligkeit zeigt sich darin, daß die Bewohner der Kolonie gemeinsame Arbeiten unternehmen. So sind die Biber durch ihre gesellig ausgeführten Bauten berühmt. Aus Aststücken und aus Schlamm bauen sie Dämme, durch welche das Wasser gestaut wird. Diese Arbeiten werden von den zahlreichen Individuen einer Kolonie gemeinsam ausgeführt und kommen der ganzen Kolonie zugut, die aus vielen Einzelbauten bestehen kann.

Sehr häufig sind die Zusammenscharungen bei den Wanderungen. Manche Fische (z. B. die Heringe) ziehen in großen Schwärmen zu ihren Laichplätzen. Die meisten Zugvögel bilden große Scharen und versammeln sich häufig schon vor der Reisezeit zu Schwärmen (Stare, Schwalben, Störche). Viele Zugvögel haben einen Lockruf, durch den sie sich auf der Reise zusammenhalten, was besonders für diejenigen Zugvögel wichtig ist, welche des Nachts wandern. — Auch viele Säugetiere versammeln sich bei Wanderungen in großer Zahl. Die Lemminge wandern in ungezählten Scharen, die Renntiere vereinigen sich bei ihren Wanderzügen zu großen Herden, ebenso die Saiga-Antilopen und die Springböcke.

Ein Trieb zur Geselligkeit kommt bei so vielen Vögeln und Säugetieren vor, und die Umstände, unter welchen die Vereinigungen stattfinden, sind so mannigfaltig, daß hier nicht alle Möglichkeiten in Betracht gezogen werden können. Es mag nur noch darauf hingewiesen werden, daß die Bildung von Schwärmen, Scharen, Rudeln oder Herden im Kampf ums Dasein mannigfache Vorteile gewährt. Das Herannahen eines Feindes kann vielleicht von einem einzelnen Tier übersehen werden, aber entgeht selten der Aufmerksamkeit einer Schar oder eines Rudels; bei den Vogelscharen veranlaßt ein wegfliegendes Tier auch die anderen zur Flucht, wenn sie selbst die Gefahr nicht bemerken; viele gesellig lebende Säugetiere (Gemsen, Murmeltiere u. a.) haben ein Warnungszeichen, bei welchem die ganze Gesellschaft augenblicklich entflieht[1]). In einer Schar von Affen ist ein altes Männchen der Führer und Wächter, welcher von Zeit zu Zeit Umschau hält und im Falle der Gefahr einen eigenartigen Warnungslaut gibt. Bei wehrfähigen Tieren kann ein Feind nicht leicht in die Herde eindringen, wie ja von Stieren und Bisonbullen bekannt ist, daß sie die Herde beschützen. Aber selbst wenn die Tiere wehrlos sind, und eine Flucht nicht möglich ist, gewährt die Zusammenscharung einen biologischen Vorteil, indem die Raubtiere einer großen Schar

---

[1]) Da die Madenfresser mit den Kuckucken verwandt sind, ließe sich vielleicht der eigenartige Instinkt unseres Kuckucks aus einem derartigen Zustand ableiten. Bei diesem gemeinsamen Brüten kann eine Rasse entstehen, welche zwar Eier in das Nest legt, aber sich an dem Brüten nicht mehr beteiligt. Nimmt diese Rasse überhand, so kann sie nur dann bestehen bleiben, wenn sie die Eier in die Nester anderer Vogelarten legt.

[2]) Der Wildhund Indiens, Kolsun oder Buansu (Canis primaevus Hodgs.) in Meuten von 5 bis 20 Stück, der afrikanische Hyänenhund (Canis pictus Desm.) in Scharen bis zu 60 Stück.

[3]) Espinas schreibt: „Die Schimpansen scheinen in größeren oder kleineren Trupps zu leben je nach der Sicherheit, deren sie sich erfreuen; eine Art (der Joko der Eingeborenen) bildet beständige Herden aus mehreren monogamen Paaren".

[1]) Das Zeichen besteht bei dem Gemsen und bei den Murmeltieren in einem pfeifenden Ton. Die Kaninchen geben das Zeichen zur Flucht, indem sie mit dem Hinterfüßen auf den Boden stampfen.

keinen erheblichen Schaden zuzufügen vermögen; z. B. werden die Lemmingzüge von allerlei Raubtieren verfolgt, aber die Zahl der Lemminge ist so groß, daß die Raubtiere doch nur einen kleinen Teil verzehren können. — Zuweilen dient die Zusammenscharung nicht zum Schutz, sondern zum Angriff. Eine Rotte von Raubtieren kann ein großes Beutetier leichter überwältigen, wie z. B. ein Rudel hungriger Wölfe selbst einem Renntier oder Hirsch gefährlich wird. Eine Schar von Affen vertreibt einzelne Affen oder eine schwächere Schar von einem beliebten Futterplatze. — Gesellige Tiere können sich in mannigfaltiger Art nützen. Z. B. lesen die Affen sich die Dornen ab, welche beim Zug durch eine Dornhecke in die Haut gekommen sind. Die Hamadryas-Paviane wälzen Steine um, unter denen sie Insekten und dergl. finden können, wobei so viele Tiere an einen Felsblock gehen, als zum Umwälzen nötig sind.

Da demnach die Geselligkeit in verschiedener Hinsicht biologischen Nutzen hat, sind so häufig soziale Triebe entstanden. Es wäre nicht richtig, die gesellige Vereinigung stets aus der Paarung und Familienbildung ableiten zu wollen. Ebenso falsch ist es die Familienbildung als ein Produkt der sozialen Vereinigung zu betrachten. Die Geselligkeit und die Familienbildung stehen zwar in mannigfachen Beziehungen, aber sie sind als zwei getrennte biologische Prinzipien aufzufassen; denn jedem kommen besondere Aufgaben zu.

Literatur. **Brehm**, *Tierleben. 3. Aufl.* — **H. v. Buttel-Reepen**, *Sind die Bienen Reflexmaschinen? Leipzig 1900 (Abdruck aus dem Biolog. Centralblatt*, **20.** *Bd.)*. — **Derselbe**, *Die stammesgeschichtliche Entstehung des Bienenstaates. Leipzig 1903.* — **K. Escherich**, *Die Ameise. Schilderung ihrer Lebensweise. Braunschweig 1906.* — **Derselbe**, *Die Termiten oder weißen Ameisen. Leipzig 1909.* — **Derselbe**, *Termitenleben auf Ceylon. Jena 1911.* — **A. Espinas**, *Die tierischen Gesellschaften. Deutsch von Schloesser, 2. Aufl., Braunschweig 1879.* — **A. Forel**, *Les Fourmis de la Suisse. Zürich 1874.* — **Derselbe**, *Das Sinnesleben der Insekten. München 1910.* — **E. A. Goeldi**, *Der Ameisenstaat. Leipzig 1911.* — **B. Grassi und A. Sandias**, *Constituzione e sviluppo della società dei Termitidi. Atti Accad. Gioenia. Vol.* 6. *1893.* — **J. Lubbock**, *Ameisen, Bienen und Wespen. Leipzig 1883.* — **E. Wasmann**, *Die psychischen Fähigkeiten der Ameisen. 2. Aufl. Stuttgart 1909.* — **E. Zander**, *Der Bau der Biene. Stuttgart 1911.* — **Derselbe**, *Das Leben der Biene. Stuttgart 1913.* — **H. E. Ziegler**, *Ueber den Begriff des Instinktes einst und jetzt. 2. Aufl. Jena 1910.* — **Derselbe**, *Die Naturwissenschaft und die sozialdemokratische Theorie. Stuttgart 1894.*

H. E. Ziegler.

Tierstöcke.

1. Allgemeines über die Stockbildung. 2. Stockbildung bei Protozoen. 3. Stockbildung bei vielzelligen Tieren: a) Stockbildung infolge von Teilung bei Metazoen. b) Stockbildung infolge von Knospung. 4. Zustandekommen und Ausgestaltung der Tierstöcke.

1. Allgemeines über die Stockbildung. Vereinigungen von Tieren, die derselben Art angehören und in mehr oder weniger engem Zusammenhang miteinander stehen, sei es, daß dies morphologisch in Form fester Körperverbindung oder nur hinsichtlich der Lebensgewohnheiten (in nahem räumlichen Zusammenleben) der Fall ist, pflegt man als Tierkolonien zu bezeichnen. Ständig oder zeitweise festsitzende Tiere wie Infusorien, Polypen, Seerosen, Röhrenwürmer, Rädertiere, Moostierchen, Muscheln, Haarsterne, Seescheiden u. a. bilden je nach ihrer Körperbeschaffenheit größere oder kleinere Gruppen oder Büsche und indem sie weite Strecken bedecken, stellen sie zuweilen dichte Wälder auf dem Boden des Wassers dar. Daß sich freilebende Tiere zu größeren Schwärmen oder Herden vereinigen, ist eine von den niedersten bis zu den höchsten Tierformen bekannte Tatsache; es braucht nur an die Schwärme von Infusorien, Medusen, Würmern (Palolo), Insekten (Eintagsfliegen, Heuschrecken, Termiten, Ameisen, Bienen u. a.), an diejenigen der Fische (Heringsschwärme) und vieler Vögel, sowie an die Herden der Säugetiere (Nagetiere), Huftiere (Antilopen, Hirsche, Rinder, Pferde), Affen usf. erinnert zu werden. Wenn in diesen Vereinigungen eine verschiedene Ausgestaltung der einzelnen Individuen und eine Verwendung zu verschiedenen Zwecken eintritt, so spricht man von Tierstaaten, auf welche in dem Artikel „Tierstaaten und Tiergesellschaften" eingegangen wurde. Eine solche Differenzierung, die sich in einer Vielgestaltigkeit der Individuen und einer Arbeitsteilung zwischen ihnen zu erkennen gibt, kann auch bei den Tierstöcken eine wichtige Rolle spielen.

Für die als Tierstöcke anzusprechenden Vereinigungen von Individuen der gleichen Tierart ist kennzeichnend, daß bei ihnen die sie zusammensetzenden Individuen organisch miteinander verbunden sind, wie es sich aus der für sie ebenfalls charakteristischen Entstehung auf dem Wege der ungeschlechtlichen Fortpflanzung ergibt. Meistens ist es Knospung, seltener Teilung, welche zur Bildung von Tierstöcken führt. Durch immer weitere Fortführung der Knospung können die Stöcke einen sehr beträchtlichen Umfang erlangen. Zumeist sind sie festgewachsen; es braucht aber kaum besonders erwähnt zu werden, daß sie, ob frei lebend oder fest-

sitzend, stets auf das Leben im Wasser angewiesen sind. Tierstöcke finden sich also nur bei Wasser bewohnenden Tieren.

Es macht einen großen Unterschied und erweist sich von wichtiger Bedeutung für die Beschaffenheit und den Aufbau des Stockes, ob es sich um einzellige oder mehrzellige Tiere handelt. Im ersteren Fall geht die Stockbildung von einer Zelle aus, die durch Teilung oder Knospung neuen Zellindividuen den Ursprung gibt. Indem diese sich ihrerseits auf dieselbe Weise fortpflanzen, kommt es zur Bildung einer „Zellkolonie" oder eines „Zellenstaats", welcher zumal dann, wenn an seinen Individuen Polymorphismus und Arbeitsteilung auftreten, dem Körper eines Metazoons vergleichbar ist. Im anderen Fall geht die Stockbildung bereits von einem mehrzelligen Tier aus, welches auf dem Wege der ungeschlechtlichen Fortpflanzung, d. h. ebenfalls durch Teilung oder Knospung, neue Individuen liefert, die mit ihm ebenso wie unter sich vereinigt bleiben. In beiden Fällen ist also die Individualitätsstufe des Ausgangspunktes eine verschiedene; schon aus diesem Grunde müssen die Ergebnisse differenter Natur sein. Unter Berücksichtigung dieses Verhaltens geht man bei der Darstellung der Tierstöcke am besten von den als Urtiere freilebenden Zellen aus.

2. Stockbildung der Protozoen. Kolonien von Einzeltieren können bei den Protozoen auf sehr einfache Weise dadurch zustande kommen, daß die durch Teilung auseinander hervorgegangenen Individuen mehr oder weniger eng miteinander verbunden bleiben. Dies kann auf die Weise geschehen, daß sie zwar nach vollzogener Teilung zunächst auseinander weichen, daß aber Protoplasmabrücken die Verbindung zwischen ihnen aufrecht erhalten, wie man dies bei Amöbinen, Thalamophoren, Heliozoen und anderen Rhizopoden, wie auch bei Flagellaten beobachten kann. So kommen bei verschiedenen Sonnentierchen, bei Mikrogamia und anderen Rhizopoden größere oder kleinere Komplexe zustande, in denen die Einzeltiere durch Plasmafäden im Zusammenhang stehen (Fig. 1 und 2).

Bei zahlreichen Flagellaten bleiben die durch Längs- oder Querteilung auseinander hervorgegangenen Individuen eng zusammen liegen, dadurch kleine Kolonien bildend oder aber sie weichen weiter auseinander und werden dann von gallertigen oder andersartigen Hüllen zusammen gehalten (Fig. 3 und 4). Wenn derartige, mehr oder weniger individuenreiche Kolonien sich verzweigen (Fig. 4) oder gestielt sind (Fig. 5), so erwecken sie noch mehr den Eindruck eines Stöckchens. Auch in den von einer die Einzeltiere zusammhaltenden Substanz umgebenen Kolonien können die Individuen durch Protoplasmabrücken miteinander verbunden sein, wie



Fig. 1. Aus 6 Individuen bestehende Kolonie von Sphaerastrum Fockei. Nach Doflein.

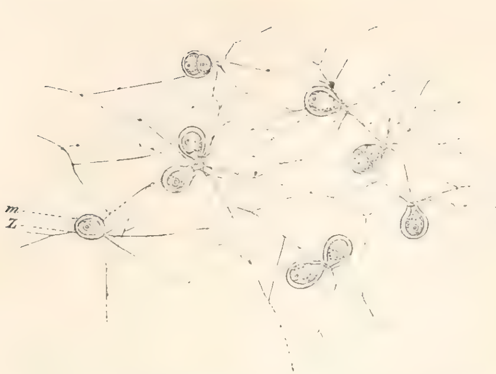


Fig. 2. Kolonie von Mikrogromia socialis. m, Z Einzeltiere und Verbindungsstrange. Nach R. Hertwig.



Fig. 4. Kolonie von Dinobryon sertularia. Nach Oltmanns.

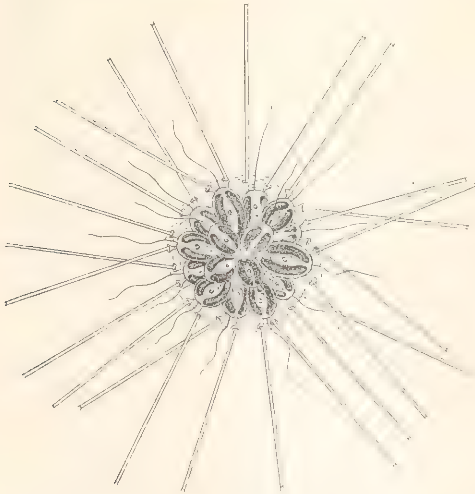


Fig. 3. Kolonie von Chrysophaerella longispina. Nach Lauterborn.



Fig. 5. Kolonie von Codonocladium umbellatum. Nach R. Hertwig.

man es besonders von den Volvoxkolonien kennt (Fig. 9).

Bei den bisher besprochenen Protozoenkolonien gaben hauptsächlich Teilungsvorgänge die Veranlassung zu ihrem Zustandekommen, doch entstehen solche und zwar besonders die durch den verzweigten Bau ausgezeichneten Stöckchen, vor allem auch durch Knospung. Der Unterschied zwischen den beiden Arten der ungeschlechtlichen Fortpflanzung ist ja überhaupt kein sehr beträchtlicher. Derartig verzweigte Stöckchen kommen besonders häufig bei den peritrichen Infusorien vor und finden

sich auch bei den Suktorien (Fig. 6 bis 8). Sehr bekannt sind die allenthalben im Süßwasser verbreiteten Stöckchen von Carchesium (Fig. 6) und Epistylis, sowie diejenigen von Ophrydium (Fig. 7). Während die ersteren als kleine, häufig aus recht vielen Individuen bestehende Stämmchen auf irgendwelchen Gegenständen oder anderen Tieren festsitzen, schwimmen die Kolonien von Ophrydium (Fig. 7) als gallertige Kugeln von mehreren Zentimeter Durchmesser frei im Wasser umher. Umfangreiche Stöckchen mit einer Art Wurzelgeflecht, von welchem die einzelnen verzweigten Stämmchen aufstreben (Fig. 8), kommen auch bei den Sauginfusorien (Suktorien) vor, die sich zumeist auf organischer Unterlage, d. h. auf dem Körper anderer Tiere finden.



Fig. 6. Stöckchen von Carchesium polypinum. Nach Doflein.

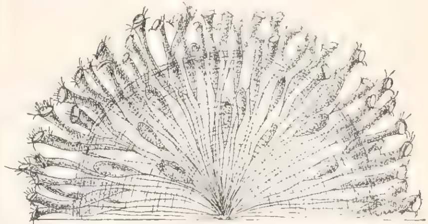


Fig. 7. Kolonie von Ophrydium Eichhorni. Nach S. Kent.



Fig. 8. Kolonie von Dendrosoma radians. Aus Doflein.

Bei allen den hier zur Erläuterung der Stockbildung herangezogenen und bei vielen anderen Protozoenkolonien handelt es sich in letzter Instanz um Zellteilungsvorgänge, welche zu ihrer Entstehung und weiteren Ausbildung führten. Die meisten dieser Stöcke gehen von einer Zelle aus, durch die und ihrer Nachkommen Teilung bezw. Knospung die Kolonie gebildet wird. Wenn in einer solchen Zellenkolonie noch Umbildungen einzelner Zellen, d. h. Differenzierungsprozesse hinzutreten, welche gewissen Zellen der Kolonie eine von den anderen abweichende Form, Struktur und Verrichtung verleihen, wenn mit anderen Worten eine Arbeitsteilung verbunden mit Polymorphismus eintritt, dann wird die bloße Zellenkolonie zum Zellenstaat. In diesem müßten also die Zellen nicht nur im festeren Verband miteinander stehen, sondern auch verschiedene Funktionen, etwa die der Bewegung, Ernährung, Empfindung, Fortpflanzung usw. annehmen. Das bekannteste Beispiel da-

für ist die Volvoxkolonie (Fig. 9), bei welcher vor allem die Differenzierung in die den gewöhnlichen Verrichtungen des Lebens vorstehenden und in die Geschlechtszellen auffällt (Fig. 9 o und s). Das Wesentliche bei diesem Schritt ist, daß die einzelnen Zellen

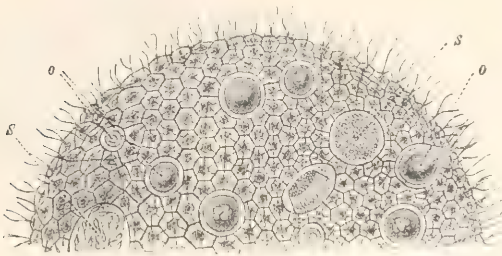


Fig. 9. Teil einer geschlechtlichen, mit Eiern (o) und Spermatozoiden (s) ausgestatteten Kolonie von Volvox globator. Aus A. Langs, Vergleichende Anatomie.

der Kolonie ihre Selbständigkeit aufgeben und Bestandteile eines Organismus werden, der zwar zunächst keine besonders große Einheitlichkeit besitzt, diese aber allmählich gewinnt. Dies kann durch immer weitergehende Differenzierung der Zellen geschehen, welche dann die Elementarbestandteile des nunmehr den Körper eines Metazoons repräsentierenden „Individuums 2. Ordnung" werden; dieses nahm von dem „Individuum 1. Ordnung", der Zelle, seinen Ausgangspunkt.

3. Stockbildung bei vielzelligen Tieren. Wie die verschiedenen Arten der ungeschlechtlichen Fortpflanzung bei Protozoen und Metazoen in einer äußerlich sehr übereinstimmenden Weise verlaufen, ohne daß sie genetisch etwas miteinander zu tun haben (vgl. den Artikel „Fortpflanzung"), so gilt ähnliches auch für die Stockbildung bei Protozoen und Metazoen. Wie die Kolonien der ersteren sowohl durch Teilung wie durch Knospung zustande kommen können, ist das gleiche auch für diejenigen der Metazoen festzustellen. Zwischen den Metazoenstöcken (etwa denjenigen der Bryozoen und Hydroiden) und denen mancher Flagellaten und Infusorien besteht entschieden eine gewisse Aehnlichkeit im äußeren Habitus, aber da es sich bei diesen, wenn neue Individuen am Stock entstehen, nur um Zellteilungsvorgänge, dort aber um ganz andere, in letzter Instanz zwar auch auf Zellteilungen zurückführbare, aber viel weitergehende Prozesse handelt, so können beide Erscheinungen nicht ohne weiteres miteinander in Beziehung gebracht werden.

3a) Stockbildung infolge von Teilung bei Metazoen. Es empfiehlt sich, von Stockbildung nur dann zu sprechen, wenn die den Stock bildenden Individuen dauernd miteinander vereinigt bleiben und also eine für die weitere Lebensführung notwendige Gemeinschaft bilden. Infolge von Teilung entstandene vorübergehende Vereinigungen mehrerer Individuen kommen häufiger vor, so bei den sich durch Teilung vermehrenden Medusen und Polypen (Hydroidpolypen und Anthozoen). Bei den Korallenpolypen sind mehr oder weniger vollständig durchgeführte Teilungen keine Seltenheit und tragen in sehr beträchtlicher Weise zur Stockbildung bei. Teilung als Anfang zur Stockbildung spielt auch bei den Würmern eine Rolle; wir brauchen nur an die Ketten von Individuen bei den Turbellarien und Anneliden zu erinnern, bei welchen ersteren sie weniger individuenreich zu sein pflegen, allerdings immerhin bis zu 16, 18 steigen können, während bei den Ringelwürmern Ketten bis zu 30 Individuen vorkommen. Wenn diese Individuen auch recht lange miteinander vereinigt bleiben, so ist es dennoch ihre Bestimmung, später voneinander getrennt zu werden, so daß jedes für sich ein freies Leben führt. Letzteres gilt auch für die bei der Strobilabildung der Scyphopolypen zustande kommenden jungen Medusen (Ephyren), welche sich von der Strobila ablösen und während des freien Lebens die Gestalt der geschlechtsreifen Meduse annehmen. Es gilt ferner auch für die Erscheinung der sogenannten lateralen und terminalen Knospung bei den Anneliden, die aber auf deren Teilung zurückzuführen sein dürfte.

In den angedeuteten Fällen handelt es sich um Ketten, welche aus gleichgerichteten, hintereinander liegenden Individuen bestehen. Infolge dieser linearen Anordnung der Individuen in der Kolonie kommt nur dem vordersten Individuum eine Mundöffnung zu, woraus sich ergibt, daß diese „terminale Knospung" für die Stockbildung weniger geeignet ist. Dies gilt auch für dasjenige Verhalten, wie es bei Anneliden ebenfalls vorkommt, daß nämlich am Hinterende des Körpers (terminal) nebeneinander liegende, jedoch ebenfalls unter sich mit dem Muttertier gleich gerichtete (also durch das Vorder-

ende mit ihm verbundene) Individuen entstehen (Fig. 10), die schließlich ein ganzes Bündel junger Tiere am Hinterende der Mutter bilden (Fig. 10B). Es sind die Geschlechtstiere, welche sich später vom mütterlichen Körper ablösen und fortschwimmen.

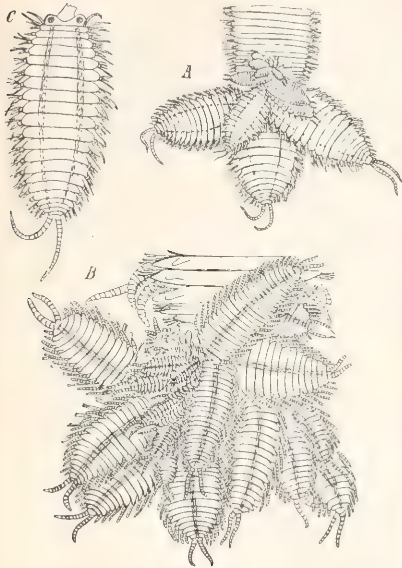


Fig. 10. A, B ventroterminale Knospung am Hinterende von Trypanosyllis. C ein durch „Knospung" entstandenes Geschlechtstier. Nach Johnson.

Der dauernden Stockbildung schon ähnlicher ist das Verhalten einer anderen Syllidee, nämlich der bekannten Syllis ramosa, welche ihren eigenartig verzweigten Körper (Fig. 11) offenbar dem Aufenthalt in dem Kanalsystem von Schwämmen verdankt. Bei ihr handelt es sich um eine seitliche Verzweigung, welche zur Verbreitung des Tiers im Schwammkanalsystem bezw. auch zur Ablösung von Geschlechtstieren führt. Der ganze Vorgang dürfte wie gesagt auf die Teilungserscheinungen anderer Anneliden zurückzuführen sein.

Wie bei den niederen Tierformen, z. B. bei den Schwämmen und Cölenteraten, Teilung und Knospung, welche beide zur Stockbildung führen können, schwer auseinander zu halten sind, so gilt ähnliches auch für die höher stehenden Tierformen. Bei den Tunikaten und zwar sowohl bei den Ascidien wie bei den Salpen kann die gewöhnlich als Knospung bezeichnete ungeschlechtliche Fortpflanzung sich mehr unter dem Bild einer Teilung vollziehen. Da die auf solche Weise entstandenen Individuen vereinigt bleiben, so ist eine vorübergehende oder dauernde



Fig. 11. Teil eines Stockes der Syllis ramosa mit Darm (d) aus einem Glasschwamm. Nach Mac Intosh.

Stockbildung die Folge. Auf diese zum Teil recht komplizierten Vorgänge soll hier nicht eingegangen, sondern auf die Artikel „Fortpflanzung und Tunikaten", besonders auf den letzteren verwiesen werden.

3b) Stockbildung infolge von Knospung. Diese Art der ungeschlechtlichen Fortpflanzung ist es zu allermeist, welche bei den Metazoen zur Stockbildung führt. Das gilt sowohl von den niederen Tierformen, ganz besonders von den Cölenteraten, wie auch von den höher stehenden, Bryozoen, Pterobranchiern, Ascidien und Salpen. Auch bei der Vermehrung durch Knospung kann die Stockbildung eine nur vorübergehende sein; es braucht nur an die aus verhältnismäßig wenigen Individuen bestehenden Stöckchen von Hydra erinnert zu werden (Fig. 12), deren Knospen sich vom Muttertier ablösen (Fig. 12), um selbständig zu

werden. Bei den meisten Hydroidpolypen hingegen, wie bei den Schwämmen und Anthozoen bleiben die durch Knospung auseinander entstandenen Individuen dauernd verbunden. Der Zusammenhang besteht nicht nur aus einem solchen der Körper-



Fig. 12. Süßwasserpolyp (Hydra oligactis) mit jüngeren und älteren Knospen, von denen die unterste im Begriff steht, sich abzulösen.

schichten, sondern besonders auch in einer Gemeinsamkeit des Gastrovascularraums, d. h. der ernährenden Körperhöhle, welche sich aus dem gemeinsamen Stamme in die ihm oder seinen Zweigen ansitzenden Polypen fortsetzt. Die von den Einzeltieren aufgenommene Nahrung kommt also dem ganzen Stock zugute und seine Einheitlichkeit tritt dadurch sehr deutlich hervor.

Gegründet wird ein derartiger Stock von der aus dem Ei hervorgegangenen frei herum schwärmenden Flimmerlarve, welche sich an einer geeigneten Stelle festsetzt und nachdem sie sich zu einem jungen Polypen umgestaltet hat, Knospen zu treiben beginnt, in ganz ähnlicher Weise, wie es vorher vom Süßwasserpolypen erwähnt wurde (Fig. 12). Hier bleiben die knospenden Individuen jedoch dauernd mit dem Stock verbunden, an dem sich ein Wurzelgeflecht, Stämmchen, Zweige und zahlreiche Einzeltiere herausbilden (Fig. 13), so daß ein umfangreicher,



Fig. 13. Teil eines Hydroidenstöckchens mit Wurzelgeflecht und von ihm aufstrebenden Einzeltieren (Polypen a bis e, f Gonangium mit Medusenknospen, g Meduse). Nach R. Hertwig.

weit verzweigter Stock entsteht. Sehr große, besonders durch das sie stützende Kalkskelett bekannte Stöcke kommen auf ganz ähnliche Weise bei den Korallen zustande, bei denen ebenfalls wie bei jenen die einzelnen Individuen durch ihr Gastralsystem miteinander kommunizieren, so daß auch dadurch ein sehr inniger Zusammenhang zwischen den einzelnen Individuen gewährleistet wird.

Letzteres ist, wenn auch nicht in demselben Maße bei den Stöcken der Moostierchen (Bryozoen) der Fall, bei denen zwar nicht das Darmsystem der ebenfalls durch Knospung entstandenen Stöcke, wohl aber die Leibeshöhle der einzelnen Individuen in

Verbindung steht und eine dem ganzen Stock gemeinsame ist (vgl. den Artikel „Bryozoa“). Somit ist auch bei den Byrozoenstöcken der Zusammenhang zwischen den sie bildenden Individuen ein sehr inniger, etwa nicht nur die äußeren Körperteile betreffender; vielmehr erstreckt er sich auch bei diesen viel höher organisierten Tieren noch auf einen Teil der inneren Organe. Der Habitus mancher Bryozoenstöckchen erinnert recht sehr an diejenigen der Hydroidenstöcke, von denen sie freilich in ihrer ganzen Organisation völlig verschieden sind.

Hauptsächlich auf dem Wege der Knospung kommen auch die Stöcke der Manteltiere (Tunikaten) zustande, die je nachdem kleinere oder größere Kolonien bilden und deren Individuen durch ein ernährendes Kanalsystem in Verbindung stehen, wie sie auch von einem gemeinsamen, sie zusammenhaltenden Zellulosemantel umgeben sein können (Fig. 14).

4. **Zustandekommen und Ausgestaltung der Tierstöcke.** Wenn von Tierstöcken die Rede ist, so handelt es sich in der Hauptsache um Tiere, die eine festsitzende Lebensweise führen oder doch von solchen abstammen, bei denen dies der Fall war. So gehören denn auch die meisten der hier behandelten Tierstöcke festsitzenden Tieren an, was sowohl für die Hydroidpolypen und Korallen, wie für die Bryozoen, Pterobranchier und Ascidien gilt. Auch bei den Protozoen sieht man Stockbildung und festsitzende Lebensweise vielfach Hand in Hand gehen, wie wir es vorher von Infusorien und Flagellaten (Fig. 4 bis 6) kennen lernten, wenn es freilich auch bei ihnen nicht immer der Fall ist und es zweifelhaft erscheint, ob sich die Koloniebildung bei ihnen gerade immer auf eine sessile Lebensweise zurückführen läßt. Daß durch Teilung sich vermehrende Zellen zunächst vereinigt bleiben und vermittelst protoplasmatischer Verbindungen oder um die Zellen ausgeschiedener Substanzen den Zusammenhang dauernd bewahren, um dadurch zu freischwimmenden Kolonien zu werden, erscheint recht naheliegend und wir finden ähnliches bei den Ketten der Plattwürmer und Anneliden, die sich freilich später voneinander trennen, so daß ihre Einzelindividuen zur Selbständigkeit gelangen.

Stockbildung in Verbindung mit festsitzender Lebensweise erweist sich in verschiedener Hinsicht für das Gedeihen der betreffenden Tiere als besonders nützlich. An gut geschützten Oertlichkeiten oder an solchen, an welchen die Nahrungszufuhr für die betreffende Tierart eine besonders reiche ist, kann es praktisch sein, daß möglichst viele Individuen einer Tierart auftreten, um diese günstigen Verhältnisse auszunützen. Wenn sich das Tier in dieser Umgebung nicht nur festzusetzen, sondern auch (durch Knospung) mit ihm in Verbindung bleibende Individuen zu erzeugen vermag, so wird das unter Umständen günstiger sein, als wenn es sich an der betreffenden Oertlichkeit frei herum bewegt oder zahlreiche Individuen sich nebeneinander festsetzen. Die Ausnützung der Strömungs- und Zufuhrverhältnisse durch einen reich verzweigten, gestielten oder sonst wie günstig orientierten Stock, kann zur Hervorbringung einer reichen Individuenzahl und weitgehenden Ausbreitung derartiger Stöcke führen, wie wir dies von den obigen genannten Tieren

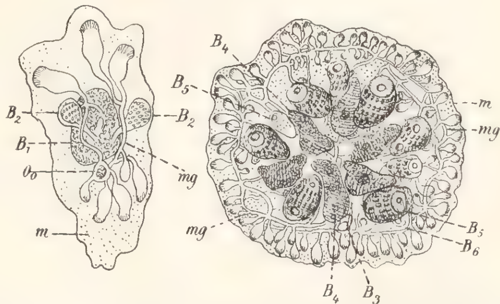


Fig. 14. Junge und etwas ältere Botryllus-(Seescheiden-) Kolonie O, B_2 bis B_6 die einzelnen Individuen, m Mantel, mg Mantelgefäße. Nach Pizon.

(Hydroidpolypen, Korallen und Bryozoen) kennen. Dem Wasserstrom eine möglichst große Fläche darzubieten, wird sich insofern als nützlich erweisen, als dadurch die Aufnahmefähigkeit für Nahrungsteile stark vermehrt wird und diese direkt oder indirekt dem ganzen Stock zugute kommen. Solche mehr oder weniger ausgebreitete Stöcke zeigen je nach ihrer Entstehung, nach der Unterlage, auf der sie wachsen, nach den Strömungsverhältnissen und sonstigen Lebensbedingungen recht verschiedene Gastaltungen. Es sei nur an die Klumpen oder Krusten bildenden durch Teilung oder Knospung entstandenen Kolonien der Schwämme, Korallen und

Ascidien, an die kriechenden, sich durch Ausläufer (Stolonen) weiter verbreitenden Stöcke der Hydroidpolypen, Korallen und Bryozoen erinnert. Durch stolonenartige Ausläufer vermögen sich auch die Stöcke der Manteltiere auszubreiten, sei es, daß sie wie die Ascidien festsitzen oder wie die Salpen frei herum schwimmen. Um einen gestreckten oder gedrungenen Stamm gruppieren sich die zahlreichen sehr verschiedenartig gestalteten Individuen der Siphonophoren, während die festsitzenden Hydroidpolypen, Korallen und Bryozoen reich verzweigte, pflanzenähnlich erscheinende Stöcke aufweisen können, deren Wachstum und Verzweigung nach bestimmten Gesetzen geregelt erscheinen.

Derartige und andere umfangreiche Stöcke bedürfen besonderer Einrichtungen, um ihnen die dauernde Existenz und weitere Ausbreitung zu ermöglichen. Neben Zirkulationsvorrichtungen im Körperinnern kommen dabei vor allen Dingen Stützeinrichtungen in Betracht, die den Stock und seine einzelnen Teile aufrecht erhalten. Zumeist handelt es sich dabei um kutikulare, chitinisierte oder verkalkende Hüllen, sowie um Einlagerungen von Kalkkörpern ins Gewebe, welche sich zu stützenden Massen in der Umgebung oder innerhalb der Weichteile des Stockes verdichten, wie dies für das Periderm und die Ectocyste der Hydroidpolypen und Bryozoen, den Zellulosemantel der Ascidien, das Kalkskelett der Korallen u. a. gilt. Außer den stützenden braucht der Stock häufig auch solche Vorrichtungen, die zu seinem Schutz, seiner Verteidigung, zur Bewegung und Vermehrung seiner Einzeltiere oder des ganzen Stockes dienen. Ehe darauf eingegangen wird, so weit dies hier beabsichtigt ist, sei noch auf ein anderes, bisher vernachlässigtes Verhalten der Tierstöcke bei den Metazoen hingewiesen.

Bei den letzten Betrachtungen wurde auf das Festsitzen der Stöcke und ihr Zustandekommen in Verbindung mit der sessilen Lebensweise besonderes Gewicht gelegt. In den durch Stockbildung ausgezeichneten Abteilungen des Tierreichs finden sich aber häufig auch solche Tierformen, die ein freies Leben führen und trotzdem auf dem Wege der Knospung vorübergehende oder bleibende Kolonien bilden. Es sei an die Hydroidpolypen und Siphonophoren, sowie an die Pyrosomen und Salpen erinnert. Bei allen diesen Tieren ist es sehr wahrscheinlich, daß die Fähigkeit zur Kolonie- und Stockbildung auf diese Eigenschaft ihrer Verwandten zurückzuführen ist. Grundsätzlich bieten die freischwimmenden von den festsitzenden Tierstöcken keine besondere Verschiedenheit. Sie können aus ziemlich gleichartigen Individuen bestehen, wie es bei den Feuerwalzen und Salpen der Fall ist oder es treten mehr oder weniger weitgehende Differenzierungen zwischen den Individuen ein, wie man es bei den Dolioliden und vor allem bei den Siphonophoren findet (näheres in den Artikeln „Cölenteraten und Tunikaten“, sowie „Fortpflanzung der Tiere“).

Von großer Bedeutung für das Gedeihen der Tierstöcke ist die zwischen den sie zusammensetzenden Individuen stattfindende Arbeitsteilung, auf welche deshalb im Lauf dieser Darstellung schon verschiedentlich hingewiesen werden mußte. Wie erwähnt, tritt sie bereits an den Stöcken der Protozoen auf und spielt eine wichtige Rolle in denen der Metazoen. Zwar gibt es Tierstöcke, bei denen die Einzeltiere in ihrer Organisation und in ihren Verrichtungen ganz gleichartig erscheinen, wie man dies bei den Schwämmen, manchen Hydroidpolypen, Bryozoen, Pyrosomen und Salpen findet, während bei anderen Hydroidpolypen, Bryozoen und Tunikaten infolge der Verteilung einzelner Verrichtungen auf verschiedene Individuen des Stockes anfangs nur geringe, später weitergehende gestaltliche Differenzen zwischen diesen auftreten. Indem einzelne Individuen die Ernährung, Fortbewegung, Verteidigung, den Schutz des Stockes und die Fortpflanzung übernehmen, kommt es bei den genannten Tieren und ganz besonders bei den Siphonophoren zu einem recht weitgehenden **Polymorphismus**, der schließlich dazu führen kann, daß die Einzeltiere des Stockes beinahe den Eindruck von Organen eines fast einheitlichen Individuums (3. Ordnung, vgl. weiter oben) erwecken. Auf diese Erscheinungen wie auf das zu ihnen hinführende Prinzip der Arbeitsteilung mußte bereits in dem Artikel „Polymorphismus“ eingegangen werden. Auch der besonders bei den Cölenteraten und Tunikaten in Verbindung mit Stockbildung auftretende und für sie bedeutungsvolle Generationswechsel soll hier weiter nicht berücksichtigt werden (vgl. den Artikel „Fortpflanzung der Tiere“). Die Tatsache, daß besondere Geschlechtstiere an den Stöcken auftreten und sich von ihnen ablösen oder mit ihnen verbunden bleiben, mußte ohnehin bereits erwähnt werden. Eine solche Trennung in geschlechtliche oder nichtgeschlechtliche Tiere braucht aber an den Stöcken nicht vorhanden zu sein, wie diejenigen vieler Korallen, Bryozoen und Tunikaten zeigen, während bei anderen die Trennung in solche Individuen, die sich auf ungeschlechtlichem oder geschlechtlichem Wege fortpflanzen, durchgeführt ist. Hierbei sei übrigens noch erwähnt, daß an ein und demselben Stock männliche und weibliche Individuen vorhanden sein können, der Stock dann also monöcisch ist, daß aber andererseits manche Tierstöcke, z. B. die-

jenigen vom Hydroidpolypen, Siphonophoren und Korallen (Tubularia, Podocoryne, Diphyes, Pennatula), diöcisch sind, so daß auf dem einen Stock nur männliche, auf dem anderen nur weibliche Individuen anzutreffen sind. Männliche und weibliche Stöcke dürfen dann nicht zu weit voneinander entfernt sein, um ein Zusammentreffen der Geschlechtsprodukte zu ermöglichen, denn es braucht kaum besonders bemerkt zu werden, daß für die weitere Verbreitung und für die Erhaltung der Art auch bei den stockbildenden, sich auf ungeschlechtlichem Wege vermehrenden Tieren, die geschlechtliche Fortpflanzung eine unbedingte Notwendigkeit darstellt.

Literatur. ***O. Hertwig***, *Allgemeine Biologie, IV. Aufl. Jena 1912.* — ***A. Lang***, *Ueber den Einfluß der festsitzenden Lebensweise auf die Tiere usw. Jena 1888.* — ***R. Leuckart***, *Ueber den Polymorphismus der Individuen oder die Erscheinung der Arbeitsteilung in der Natur. Gießen 1851.* — ***E. Perrier***, *Traité de Zoologie. Paris 1893.* — ***A. Weismann***, *Das Keimplasma. Eine Theorie der Vererbung. Jena 1892.*

E. Korschelt.

Tierstoffe unbekannter Konstitutionen.

1. Eiweißkörper. 2. Enzyme. 3. Chitin. 4. Stoffe der Nervensubstanz: a) Cerebroside. b) Phosphatide. c) Protagon. 5. Gallenstoffe und chemisch verwandte Substanzen: a) Cholesterin. b) Isocholesterin. c) Lanolin. d) Koprosterin. e) Cholalsäuren. f) Gepaarte Cholalsäuren. 6. Im Harn enthaltene Stoffe. 7. Gifte: a) Cantharidin. b) Kobragift. c) Krötengifte. d) Salamandergifte. 8. Farbstoffe: a) Antiker Purpur. b) Karminsäure. c) Kermessäure. 9. Riechstoff Muskon.

1. **Eiweißkörper** werden in dem Artikel „Eiweißkörper" behandelt.

2. **Enzyme** werden in den Artikeln „Speichel", „Magen", „Darm", „Pankreas", „Verdauung" und „Eiweißkörper" besprochen.

3. **Chitin** bildet den organischen Hauptbestandteil der Gerüstsubstanz der Gliedertiere; es findet sich ferner in den Zellwänden von Pilzen. Chitin ist eine unlösliche, weiße, spröde Masse; seine kleinsten Bausteine scheinen aus Viererkomplexen von Monoacetylglukosaminen zu bestehen. Der Abbau des Chitins zu Glukosamin und Essigsäure erfolgt beim Kochen mit Mineralsäuren nach der Gleichung: $C_{32}H_{54}N_4O_{21} + 7H_2O = 4C_6H_{13}NO_5 + 4CH_3.CO_2H$.

4. **Stoffe der Nervensubstanz.** Die Lipoidsubstanzen des Gehirns und der Nerven lassen sich in drei Gruppen ordnen: erstens in die phosphorfreien, stickstoffhaltigen Galaktoside, die sogenannten Cerebroside, zweitens die stickstoffhaltigen Abkömmlinge der Glycerinphosphorsäure, die sogenannten Phosphatide, drittens das Protagon, die einzige bekannte schwefelhaltige Lipoidsubstanz.

4a) Cerebroside quellen mit Wasser, lassen sich aus Alkohol kristallisieren; sie spalten beim Kochen mit verdünnter Schwefelsäure Galaktose ab. Beim Anreiben mit konzentrierter Schwefelsäure werden sie erst gelb, dann purpurn (charakteristische Reaktion). Im einzelnen seien angeführt: α) Cerebrin $C_{70}H_{140}N_2O_{13}$ (?) vom Schmelzpunkt 170°, β) Homocerebrin $C_{70}H_{138}N_2O_{12}$ (?) vom Schmelzpunkt 156°; bei ihrer Spaltung durch Salpetersäure werden pro Mol. dieser Cerebroside 3 Mol. Stearinsäure abgespalten; γ) Cerebron $C_{48}H_{93}NO_9$ vom Schmelzpunkt 210°, rechtsdrehend: $[\alpha]_D = + 7{,}6°$; addiert Brom; liefert bei der Spaltung mit Schwefelsäure neben Galaktose Cerebronsäure, Sphingosin und Dimethylsphingosin. Cerebronsäure $C_{25}H_{50}O_3$ ist eine weiße, leicht in Aether lösliche Substanz, enthält eine Hydroxyl- und eine Carboxylgruppe im Molekül. Sphingosin $C_{17}H_{35}NO_2$ bildet eine weiße, undeutlich kristalline, in organischen Mitteln leicht lösliche Masse; es ist ein zweiwertiger Monoaminoalkohol mit einer Doppelbindung.

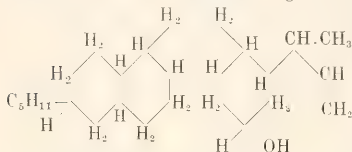
4b) Phosphatide. Die wichtigsten Phosphatide sind die Lecithine, die in dem Artikel „Alkohole" unter 2 A d) behandelt werden.

Die Lecithine sind Monoamidomonophosphatide: Stickstoff und Phosphor sind in ihnen im Verhältnis 1:1 enthalten. Ein Monoamidodiphosphatid (N:P = 1:2) ist das Kuorin des Ochsenherzens; als Spaltprodukte liefert es Glycerin, 3 Mole ungesättigter Fettsäuren, 2 Mole Phosphorsäure und 1 Mol einer, nicht mit Cholin identischen, Base.

4c) Protagon kristallisiert aus warmem Alkohol in weißen Nadeln, ist in den meisten organischen Mitteln schwer löslich, quillt mit Wasser; schmilzt nach vorherigem Erweichen bei 200°. Durch Barytspaltung entstehen aus Protagon Cerebroside und die Spaltstücke des Lecithins: Glycerinphosphorsäure, Stearinsäure oder eine ähnliche Säure und Cholin. Der Schwefel scheint im Protagon als Schwefelsäure enthalten zu sein, die ätherartig mit dem Cerebrosidkomplex des Moleküls verbunden ist.

5. **Gallenstoffe und chemisch verwandte Substanzen.** 5a) Cholesterin, $C_{27}H_{45}OH$, ist ein einwertiger, ungesättigter, sekundärer Terpenalkohol. Es findet sich in der Galle und, allerdings meist bloß in geringer Menge, überhaupt in fast allen tierischen Säften und Flüssigkeiten; besonders reichlich kommt es im Gehirn und Nerven-

system vor, ferner in Eidottern, im Sperma; es tritt auch, z. B. im Blut und Wollfett, in Form von Fettsäureestern auf. Pathologisch findet es sich in Gallensteinen, die bis zu 98% davon enthalten. Ueber seine Konstitution läßt sich folgendes mit Bestimmtheit aussagen: Im Cholesterinmolekül, das eine Vinyl- und eine Isoamylgruppe enthält, sind vier gesättigte hydrierte Ringe vorhanden; die Hydroxylgruppe steht in einem hydrierten Ring zwischen zwei Methylengruppen. Das folgende Formelbild[1]), in dem die noch nicht bewiesene Stellung der Isoamylgruppe willkürlich angenommen ist, dürfte eine ziemlich richtige Vorstellung von der Konstitution des Cholesterins geben:



Das Cholesterin kristallisiert mit einem Mol. Wasser in durchsichtigen Tafeln oder in perlmutterglänzenden Blättchen, aus Chloroform in wasserfreien Nadeln vom Schmelzpunkt 148,5⁰. Unlöslich in Wasser, Säuren und Alkalien, löst es sich leicht in Benzol, Aether, Chloroform und heißem Alkohol; es ist linksdrehend: $[\alpha]_D = -31{,}1^0$ (in 2prozentiger ätherischer Lösung). Durch Reduktion mit Natrium in Amylalkohol entsteht der Kohlenwasserstoff Cholesten $C_{27}H_{46}$ vom Schmelzpunkt 90⁰. Brom bildet ein charakteristisches Dibromid $C_{27}H_{45}Br_2OH$, Nadeln vom Schmelzpunkt 125⁰. An einigen Säureestern des Cholesterins wurde der kristallinflüssige Zustand beobachtet; so schmilzt das Benzoat bei 145⁰ zu einer trüben Flüssigkeit, die bei 178⁰ plötzlich klar wird; beim Abkühlen wird die Schmelze erst tiefblau, dann trübe, darauf violettblau, um schließlich farblos zu erstarren. Das geschmolzene Cholesterinpropionat wird bei langsamem Abkühlen violett und dann allmählich blau, grün und rot (charakteristisch). Von den durch konzentrierte Schwefelsäure bewirkten Farbenreaktionen des Cholesterins sei die Liebermann-Burchardsche Reaktion angeführt: Setzt man zu einer Lösung von Cholesterin in wenig Chloroform 0,5 ccm Essigsäureanhydrid und dann tropfenweise konzentrierte Schwefelsäure, so wird das Gemenge erst rot, dann blau, schließlich bleibend grün. — Cholesterin vermag die Hämolyse durch Saponine zu verhindern. Diese Schutzwirkung des Cholesterins, die durch Besetzung seiner Hydroxylgruppe aufgehoben wird, beruht darauf, daß es sich mit Saponinen zu äußerst schwer löslichen, wohl charakterisierten Verbindungen vereinigt, den sogenannten Saponincholesteriden, die auf ein Mol Cholesterin ein Mol Saponin enthalten und teilweise recht beständig sind.

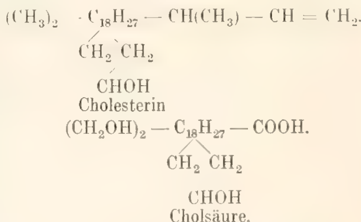
[1]) Von Windaus und Stein aufgestellt.

5b) Isocholesterin, $C_{26}H_{43}OH$, bildet Nadeln vom Schmelzpunkt 138⁰, dreht nach rechts.

5c) Lanolin. Das aus der rohen Schafwolle gewonnene Wollfett besteht wesentlich aus den Estern des Cholesterins und Isocholesterins mit höheren Fettsäuren, von welch letzteren genannt seien: die Myristinsäure $C_{14}H_{28}O_2$, Carnaubasäure $C_{24}H_{48}O_2$, Cerotinsäure $C_{26}H_{52}O_2$, Lanopalminsäure $C_{16}H_{32}O_3$ und Lanocerinsäure $C_{30}H_{60}O_4$. Auch Oxycholesterine enthält das Wollfett; es vermag mehr als sein doppeltes Gewicht Wasser aufzunehmen, ohne seine salbenartige Konsistenz zu verlieren. Das wasserhaltige Wollfett, das sogenannte Lanolin, findet als Salbenfett ausgedehnte Anwendung.

5d) Koprosterin, aus Menschenfäces isoliert, scheint ein Dihydrocholesterin zu sein; es bildet Nadeln vom Schmelzpunkt 96⁰, dreht nach rechts.

5e) Cholalsäuren. Von den Cholalsäuren, die mit Taurin oder Glykokoll gepaart, in der Galle als Alkalisalze vorkommen, werden bloß die beiden aus Menschengalle isolierten, die Cholsäure $C_{24}H_{40}O_5$ und die um ein Sauerstoffatom ärmere Choleinsäure $C_{24}H_{40}O_4$ beschrieben; ihre nahe Beziehung zum Cholesterin wird aus der Gegenüberstellung der Formeln für Cholesterin und Cholsäure ersichtlich:



Die Cholsäure $C_{24}H_{40}O_5$, eine einbasische Oxysäure mit zwei primären und einer sekundären Alkoholgruppe, kristallisiert mit 1 Mol Wasser oder 1 Mol Alkohol in rhombischen Prismen oder Tetraedern, die an der Luft bald undurchsichtig und porzellanweiß werden, schwer in Wasser, leicht in Alkohol löslich sind. Die Lösungen schmecken süßlich bitter. Der Schmelzpunkt der getrockneten Säure liegt bei 198⁰. $[\alpha]_D = +37^0$. Mit Jod entsteht eine blaue charakteristische Verbindung (Reaktion von

Mylius). Beim Eintragen von Cholsäure in 25prozentige Salzsäure tritt eine ziemlich beständige Violettblaufärbung ein. Die Choleinsäure $C_{24}H_{40}O_4$ kristallisiert in wasserfreien, bitterschmeckenden Prismen vom Schmelzpunkt 185 bis 190°; sehr schwer in Wasser löslich; $[\alpha]_D = +49°$ (in 2,5prozentiger alkoholischer Lösung); gibt keine blaue Jodverbindung und auch keine Farbenreaktion mit Salzsäure.

5f) Gepaarte Cholalsäuren. Von diesen, den sogenannten Gallensäuren, die sämtlich rechtsdrehend sind, seien die beiden wichtigsten, die Glykocholsäure und Taurocholsäure besprochen. Glykocholsäure $C_{26}H_{43}NO_6$, in Menschen- und Rindergalle, bildet feine Nadeln von süßlich bitterem Geschmack, die schwer in Wasser, leicht in Alkohol löslich sind und bei etwa 134° schmelzen; durch Hydrolyse mit Säuren oder Alkalien entstehen Cholsäure und Glykokoll. Taurocholsäure $C_{26}H_{45}NSO_7$ in den Gallen von Menschen, Fleisch- und Pflanzenfressern; kristallisiert in Nadeln, die sich oberhalb 100° zersetzen; ihr Geschmack ist süß, kaum bitter; im Gegensatz zur Glykocholsäure ist sie sehr leicht in Wasser löslich; zerfällt durch Hydrolyse in Cholsäure und Taurin.

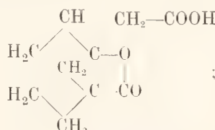
Konzentrierte Schwefelsäure löst die Gallensäuren bei Zimmertemperatur zu einer rotgelben, grün fluoreszierenden Flüssigkeit. Die empfindliche Pettenkofersche Gallensäureprobe ist darauf begründet, daß Gallensäuren mit konzentrierter Schwefelsäure und etwas Rohrzucker gelinde erwärmt, eine schön rote, allmählich mehr violett werdende Lösung geben. Diese Reaktion wird durch Furfurol hervorgerufen, das durch Einwirkung von Schwefelsäure auf Rohrzucker entsteht.

Die gallensauren Alkalien sind in Wasser und Alkohol löslich; aus alkoholischer Lösung werden sie durch vorsichtigen Aetherzusatz in rosettenartig angeordneten Nadeln gefällt; aus wässeriger Lösung lassen sie sich durch einige Neutralsalze aussalzen. Ueber die Bedeutung der gallensauren Alkalien für die Resorption der Fette s. im Artikel „Verdauung".

6. Im Harn enthaltene Stoffe. Im Harn kommen hochmolekulare, stickstoff- und schwefelhaltige organische Säuren vor, die als intermediäre Oxydationsprodukte des Eiweißes aufzufassen sind; einige dieser Säuren, die in der Literatur als Oxy-, Antoxy- und Alloxyproteinsäure, sowie als Uroferrinsäure beschrieben werden, enthalten nicht nur neutralen, sondern auch sauren Schwefel. Die Uroferrinsäure $C_{35}H_{56}N_8SO_{19}$ wurde nach der Siegfriedschen „Eisenmethode" durch Fällen mit Eisenalaun aus konzentriertem, mit Ammonsulfat gesättigtem Harn gewonnen; sie ist farblos, dagegen sind ihre Lösungen in Wasser, in dem sie äußerst leicht löslich ist, — nach der Konzentration — gelblich bis braunrot. Bei der hydrolytischen Spaltung der Uroferrinsäure wurde neben Schwefelsäure, Ammoniak und Melaninsubstanzen Asparaginsäure erhalten. — Von den Farbstoffen, denen der Harn seine Farbe verdankt, sind zu nennen: das gelbe Urochrom und Urobilin, die Pyrrolfarbstoffe sind, und von denen das letztere sicher in naher Beziehung zu den Gallenfarbstoffen steht; wahrscheinlich ist es mit dem Hydrobilirubin identisch. Das Uroerythrin, das die rote Farbe von Harnsedimenten bedingt, soll ein Skatolfarbstoff sein.

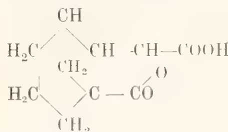
7. Gifte. 7a) Cantharidin $C_{10}H_{12}O_4$ bildet farblose, glänzende Kristalle vom Schmelzpunkt 218°, sublimiert leicht, ist in Wasser fast unlöslich, leicht löslich in Chloroform, Aceton, fetten und ätherischen Oelen; es findet sich zu etwa 1% in den spanischen Fliegen und einigen anderen Insekten; schmeckt sehr bitter; starkes Gift; zieht auf der Haut Blasen; das resorbierte Cantharidin wird größtenteils durch die Nieren ausgeschieden und bewirkt Nephritis.

Das Cantharidin ist wahrscheinlich eine Laktonkarbonsäure der Form



;

durch Kochen mit Alkalien wird der Laktonring aufgespalten unter Bildung von Salzen der in freiem Zustande sehr unbeständigen Cantharidinsäure $C_{10}H_{14}O_5$; durch Erhitzen mit Jodwasserstoffsäure wird das Cantharidin in die damit isomere Cantharsäure



vom Schmelzpunkt 274° übergeführt, die keine blasenziehende Wirkung ausübt. Cantharsäure liefert bei der Destillation mit Aetzkalk Cantharen, d. i. Dihydro-o-xylol vom Siedepunkt 135°.

7b) Kobragift. Der wirksamen Substanz des Kobragiftes, dem sogenannten Ophiotoxin, das ein in Wasser lösliches, in Alkohol und Aether unlösliches Pulver

darstellt, kommt die Formel $C_{17}H_{26}O_{10}$ zu; es ist vielleicht ein tierisches Sapotoxin. Durch Lecithin wird das hämolytisch wirkende Kobragift aktiviert; durch Cholesterin wie auch durch Kalksalze wird dagegen die Hämolyse gehemmt.

7c) Krötengifte. Aus dem Hautdrüsensekret der gemeinen Kröte wurden zwei Giftstoffe isoliert, das digitalinartig wirkende Bufotalin und das ihm chemisch nahestehende, ähnlich, aber schwächer wirkende Bufonin. Bufonin $C_{34}H_{54}O_2$ bildet Kristalle vom Schmelzpunkt 152°; ist eine neutrale, in organischen Mitteln lösliche, in Säuren und Alkalien unlösliche Verbindung, gibt in Essigsäureanhydrid mit Schwefelsäure eine der Liebermannschen Cholesterinreaktion ähnliche Farbenreaktion. Das Bufonin ist ein cholesterinähnlicher Körper, zusammengesetzt aus 2 Atomgruppen $C_{17}H_{26}OH$, die durch Kohlenstoffatome verbunden sind so daß die beiden Hydroxyle frei und z. B. durch Chlor ersetzbar bleiben.

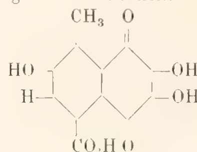
Bufotalin $C_{34}H_{46}O_{10}$, amorphe Säure, in Wasser und Benzol schwer, in Chloroform und Alkohol leicht löslich, scheint keine alkoholische Hydroxylgruppe zu enthalten. Die Lösungen seiner Alkalisalze reagieren alkalisch und schmecken sehr bitter.

7d) Salamandergifte. Aus dem Hautsekret des Feuersalamanders wurden die beiden Krampfgifte, das Samandarin $C_{26}H_{40}N_2O$ und das Samandaridin $C_{20}H_{31}NO$ in Form ihrer gut kristallisierten Sulfate isoliert. Erhitzt man das linksdrehende Samandarinsulfat längere Zeit mit konzentrierter Salzsäure, so wird die Flüssigkeit tiefblau. Beide Basen sind als Isochinolinderivate erkannt. Das Samandarin dürfte sich vom Samandaridin durch den Mehrgehalt einer Methylpyridingruppe unterscheiden.

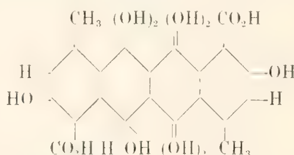
8. Farbstoffe. 8a) Antiker Purpur. Die Farbstoffe der Purpurschnecken gehören zu den Indigofarbstoffen; der eigentliche Purpur der Alten, das Punicin, das aus einem gelblichen Sekret der Art Murex brandaris am Lichte entsteht, ist wesentlich 66′-Dibromindigo.

8b) Karminsäure. Die Karminsäure findet sich in der Cochenille, dem ungeflügelten Weibchen der Schildlaus Coccus cacti coccinelliferi, die in Indien, Zentralamerika und Mexiko auf Kaktusarten in sogenannten Nopalerien gezüchtet wird. Die getrocknete Cochenille enthält ungefähr 10% Farbstoff. Die Karminsäure wird heute nur noch in sehr beschränktem Maße in der Wollfärberei zur Erzeugung scharlachroter Färbungen angewandt. Karminlacke finden als Malerfarben Verwendung. Karminsäure $C_{22}H_{22}O_{13}$ kristallisiert in granatroten Prismen; ist in Wasser und Alkohol leicht mit schön roter Farbe löslich, in Aether unlöslich; ihre Lösungen in Alkalien sind tief violett. Beim Erhitzen auf höhere Temperatur — von ca. 130° an — kondensiert sich die Karminsäure zu Anhydroprodukten. Das Karminsäuremolekül, in dem sicher Karboxyl vorhanden ist, enthält 3 durch Metall, 6 durch Methyl- oder Benzoylreste ersetzbare Wasserstoffatome. Von den Abbauprodukten der Karminsäure seien die für die Ableitung ihrer noch umstrittenen Konstitution wichtigsten genannt. Es entstehen aus ihr

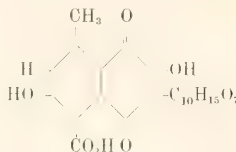
1. durch Salpetersäure: Oxalsäure und symmetrische Trinitrokresotinsäure, sogenannte Nitrococcussäure;
2. durch Brom in essigsaurer Lösung: α- und β-Bromkarmin, ein Diketohydrinden und ein α-Naphtochinonderivat;
3. durch Persulfat in alkalischer Lösung: m-Kresol-4, 5, 6-trikarbonsäure, sogenannte Cochenillesäure:
4. durch Permanganat in schwefelsaurer Lösung: Karminazarin, ein α-Naphtochinonabkömmling der Konstitution:



Während C. Liebermann und H. Voswinckel die Karminsäure als ein Naphtacenderivat von der Formel:



betrachten, stellt O. Dimroth für sie die unsymmetrische Formel:



auf, in welcher der äußerst leicht angreifbare, der aliphatischen oder hydroaromatischen Reihe angehörige Rest $C_{10}H_{15}O_7$ noch zu erforschen ist.

8c) Kermessäure $C_{18}H_{12}O_9$ findet sich in der Kermesschildlaus; sie gehört zur gleichen Farbstoffgruppe wie die Karminsäure; im Gegensatz zu letzterer löst sich die Kermessäure beträchtlich in Aether; aus Wasser, in dem sie in der Kälte schwer mit gelbstichig roter Farbe löslich ist, kristallisiert sie in ziegelroten Nädelchen; sie färbt Wolle orangerot. Dimroth stellt für diesen Farbstoff eine Konstitutionsformel auf, die

sich von seiner für die Karminsäure angenommenen dadurch unterscheidet, daß der noch aufzuklärende Rest $C_{10}H_{15}O_7$ durch $C_6H_5O_3$ ersetzt ist.

Nach den neuesten Forschungen Dimroths (Liebigs Annalen Bd. 399, Juli 1913) scheinen Karminsäure und Kermessäure Anthrachinonderivate zu sein.

9. **Muskon** $C_{16}H_{30}O$, ein Terpenketon, das zu etwa 1% im Moschus enthalten ist, ist der Träger des Moschusgeruchs; es bildet ein farbloses, dickflüssiges, linksdrehendes Oel, das unter einem Druck von 2 mm bei 143° siedet.

Literatur. **E. Abderhalden,** *Biochemisches Handlexikon, Bd.* V. *Berlin 1911.* — **Derselbe,** *Biochemische Arbeitsmethoden, Bd.* II. *Berlin 1910.* — **F. Beilstein,** *Handbuch der organischen Chemie. Hamburg und Leipzig 1893 bis 1906.* — **E. St. Faust,** *Die tierischen Gifte. Braunschweig 1906.* — **O. Hammarsten,** *Lehrbuch der physiologischen Chemie. Wiesbaden 1910.* — **H. Huppert-Neubauer,** *Analyse des Harns. Wiesbaden 1908.* — **C. Oppenheimer,** *Handbuch der Biochemie des Menschen und der Tiere. Jena 1909/10.* — **F. Röhmann,** *Biochemie. Berlin 1908.* — **H. Rupe,** *Chemie der natürlichen Farbstoffe. Braunschweig 1900 und 1909.* — **E. Schmidt,** *Lehrbuch der pharmazeutischen Chemie. Braunschweig 1911.* — **A. Tschirch,** *Handbuch der Pharmakognosie. Leipzig 1909 bis 1913.* — *Von den zahlreichen Originalabhandlungen sei nur angeführt:* **A. Windaus,** *Untersuchungen über Cholesterin. Archiv der Pharmazie, Bd.* 246, *S. 117, 1908.*

H. Liebermann.

Tinte.

1. Geschichtliches. 2. Fabrikation der Eisengallustinten. 3. Theorie der Eisengallustinten. 4. Neue Grundsätze für amtliche Tintenprüfung. 5. Analyse der Tinten.

1. **Geschichtliches.** Die Anwendung gefärbter Flüssigkeiten (Tinte, vom lateinischen „tinctum" = gefärbt) zur Hervorbringung von Schriftzügen reicht in die ältesten Zeiten geschichtlicher Ueberlieferung zurück. Die chinesiche Tusche soll von Tien-Tschen um 2600 v. Chr. erfunden sein. Sie stellte einen schwarzen Lack dar, der auf Seide aufgetragen wurde. Später verwendete man in China, Aegypten, Griechenland usw. vornehmlich Rußtinten, deren Bindemittel in der Regel aus Leim bestand. Zu erwähnen sind ferner noch Sepiatinten, aus dem Safte des Tintenfisches hergestellt, und die von den byzantinischen Kaisern persönlich benutzte Purpurtinte, die durch Auskochen von Purpurschnecken gewonnen war. Aus dem griechischen Worte *ἔγκαυστον* (= eingebrannt oder gekocht) stammen die Bezeichnungen „inchiostro" im Italienischen, „encre" im Französischen, „ink" im Englischen und „inckt" im Holländischen.

Eisenhaltige Tinten waren gelegentlich bereits im Altertum bekannt, kamen aber erst im Mittelalter in allgemeineren Gebrauch. Die Eisengallustinten wurden durch Vermischen des wässerigen Auszuges von Galläpfeln mit Eisensalzen und Aufschlemmen des entstehenden tiefblauschwarz gefärbten Niederschlages in einer wässerigen Flüssigkeit hergestellt, die durch Zusatz von etwas Gummi arabicum dickflüssiger gemacht war. Der Eisengallusfarbstoff war also hierbei von vornherein fertig gebildet vorhanden. Im Gegensatz hierzu bildet sich der gleiche Farbstoff bei den heutigen nach dem Vorgange Leonhardis (1856) bereiteten Eisengallustinten erst im Papier. Sie werden hergestellt durch Kochen von Galläpfelauszug bezw. dessen Hauptbestandteilen, Gerb- und Gallussäure, mit Eisenoxydulsalz bei Gegenwart von etwas freier Säure. Zum Sichtbarmachen der an sich farblosen Schriftzüge wird ein vorläufiger Farbstoff (Anilinfarbe) zugefügt. Der Eisengallusfarbstoff bildet sich auf dem Papier durch Oxydation mittels des Luftsauerstoffes, wobei der vorläufige Farbstoff überdeckt wird (Nachdunkeln der Schriftzüge). Die modernen Eisengallustinten sind im Gegensatze zu den mittelalterlichen klar filtrierbare Lösungen.

Neben den Eisengallustinten, deren Schrift sich durch besondere Haltbarkeit auszeichnet, so daß z. B. für die preußischen Behörden die Verwendung derartiger Tinten für lange aufzubewahrende Akten vorgeschrieben ist, finden namentlich Blauholztinten, durch Einwirkung von Kaliumbichromat auf Blauholzauszug gewonnen (Schultinte, Kaisertinte), und Auflösungen organischer Farbstoffe, z. B. von Methylviolett (Hektographentinte) heutzutage Verwendung.

2. **Fabrikation der Eisengallustinten.** Als Ausgangsmaterialien dienen reine Gerb- und Gallussäure oder unmittelbar die wässerigen Auszüge von Galläpfeln (Aleppo-Gallen, chinesische und japanische Gallen) oder von anderen Gerbmaterialien, z. B. Myrobalanen, Divi-Divi u. a. Die wässerige Lösung der Gerb- und Gallussäure wird in großen Bottichen mit den übrigen Bestandteilen, Eisenoxydulsalz, freie Säure, Gummi arabicum, antiseptischen Zusätzen, vorläufigem Farbstoff usw. unter Luftabschluß erhitzt, nach dem Erkalten in kleinere Gefäße abgefüllt und der meist geringe Bodensatz absetzen gelassen. Endlich wird die klare Lösung in Flaschen gefüllt.

3. Theorie der Eisengallustinten. Umfassende Versuche von Schluttig und Neumann haben gezeigt, daß stickstofffreie, phenolartige Körper mit Eisensalzen nur dann auf Papier fixierbare, kräftige Färbungen liefern, wenn sie entweder zwei freie Hydroxylgruppen oder eine Hydroxyl- und eine Karboxylgruppe in Orthostellung zueinander enthalten. Die Gallussäure enthält drei Hydroxyl- und eine Karboxylgruppe in benachbarter Stellung. Hier tritt demnach besonders intensive Tintenbildung auf. Die Färbung wird bedingt durch das Eintreten von Eisen in die Hydroxylgruppen, es findet also nicht etwa einfache Salzbildung statt.

4. Neue Grundsätze für amtliche Tintenprüfung. Für preußische Behörden sind unter dem 22. Mai 1912 neue Vorschriften über die Verwendung von Tinten für amtlichen Gebrauch erschienen. Die wichtigsten Bestimmungen daraus seien im folgenden auszugsweise wiedergegeben:

Grundsätze für amtliche Tintenprüfung.

Klassifizierung der Tinten.

Die Tinten werden eingeteilt in „Urkundentinten" (früher Klasse I) und „Schreibtinten".

Bei letzteren werden unterschieden: A. Eisengallusschreibtinten, B. Blauholz- und Farbstoffschreibtinten.

„Urkundentinte" ist eine Eisengallustinte, die nach 8tägigem Trocknen an der Luft tiefdunkle Schrift liefert.[1]) Sie muß mindestens 27 g wasserfreie Gerb- und Gallussäure und 4 g Eisen (auf Metall berechnet) im Liter enthalten. Andererseits darf der Eisengehalt bei Gegenwart von 27 g wasserfreier Gerb- und Gallussäure 6 g im Liter nicht übersteigen. Das Verhältnis von wasserfreier Gerb- und Gallussäure: Eisen muß demnach zwischen 4,5:1 und 6,75:1 liegen. Die Tinte muß mindestens 14tägige Haltbarkeit im Glase besitzen, d. h. sie soll nach dieser Zeit weder Blätterbildung, noch Wandbeschlag, noch Bodensatz zeigen. Die 8 Tage alten Schriftzüge müssen nach Waschen mit Wasser und Alkohol (85 und 50%) tiefdunkel bleiben.

Die Tinte muß leicht aus der Feder fließen und darf selbst unmittelbar nach dem Trocknen nicht klebrig sein.

„Schreibtinte". Gruppe A. Eisengallusschreibtinte. Tinten, welche tiefdunkle Schriftzüge liefern, die nach 8tägigem Trocknen an der Luft beim Auswaschen mit Wasser und Alkohol (85 und 50%) tiefdunkel bleiben.[1]) Der Gehalt an wasserfreier Gerb- und Gallussäure soll mindestens 18 g, an Eisen (auf Metall berechnet) mindestens 2,6 g im Liter betragen. Andererseits darf der Eisengehalt bei Gegenwart von 18 g wasserfreier Gerb- und Gallussäure 4 g im Liter nicht übersteigen. Das Verhältnis von wasserfreier Gerb- und Gallussäure: Eisen muß demnach zwischen 4,5:1 und 6,75:1 liegen.

Die Tinten sollen mindestens 14tägige Haltbarkeit im Glase besitzen, d. h. sie sollen nach dieser Zeit weder Blätterbildung, noch Wandbeschlag, noch Bodensatz zeigen.

Sie müssen leicht aus der Feder fließen und dürfen selbst unmittelbar nach dem Trocknen nicht klebrig sein.

Schreibtinten der Gruppe B unterliegen nicht der amtlichen Prüfung.

5. Analyse von Eisengallustinten. Die Bestimmung der Gerb- und Gallussäure erfolgt bei den amtlich vorgeschriebenen Verfahren durch Ausziehen der mit Salzsäure angesäuerten Tinte mit Essigester. Das Gewicht des Rückstandes vom Essigesterauszug nach dem Trocknen wird als wasserfreie Gerb- und Gallussäure angesprochen. Um Fälschungen nach Möglichkeit auszuschließen, wird der gewogene Rückstand bei Gegenwart von Natriumbikarbonat mit überschüssiger Jodlösung behandelt und der Jodverbrauch nach genügender Zeit durch Zurücktitrieren des Jodüberschusses mit Natriumthiosulfat bestimmt.

Zur Bestimmung des Eisens wird eine abgemessene Menge der Tinte eingedampft, der Rückstand verascht, mit Salzsäure aufgenommen und die schwach salzsaure Lösung zur jodometrischen Bestimmung des Eisens verwendet.

Für die Ermittelung der Auswaschbarkeit der Schriftzüge sowie für die Feststellung der Haltbarkeit der Tinte im Glase sind in den Einzelheiten festgelegte Arbeitsweisen vorgeschrieben.

Literatur. ***F. W. Hinrichsen.*** *Die Untersuchung von Eisengallustinten. Verlag von F. Enke, Stuttgart 1909.* — ***Schluttig und Neumann,*** *Die Eisengallustinten. Dresden 1890, Kapitel „Tinte" in Muspratts Chemie, 4. Aufl., 8. Bd., Verlag von Vieweg, Braunschweig 1905.*

F. W. Hinrichsen.

[1]) „Tiefdunkel" entspricht etwa der Färbung einer Vergleichstinte von folgender Zusammensetzung: 23,4 g Tannin; 7,7g Gallussäure (krist.); 30,0 g Eisenvitriol; 10,0 g Gummi arabicum; 2,5 HCl entsprechende Salzsäure und 1,0 g Karbolsäure im Liter.

[1]) „Tiefdunkel" entspricht etwa der Färbung einer Vergleichstinte von folgender Zusammensetzung: 15,6 g Tannin; 5,1 g Gallussäure (krist.); 20,0 g Eisenvitriol; 10,0 g Gummi arabicum; 2,5 g HCl entsprechende Salzsäure und 1,0 g Karbolsäure im Liter.

Titanmineralien.

1. Allgemeines. 2. Beschreibung der Mineralien. a) Oxyde. b) Ferrite. c) Ortotitanate. d) Metatitanate. e) Silicotitanate. f) Borotitanate.

1. Allgemeines. Früher hat man das Titan für ein verhältnismäßig seltenes Element gehalten, weil es nirgends auf der Erde in großen Lagern vorkommt. Dafür ist es aber außerordentlich weit verbreitet. Von 800 durch Clarke analysierten Gesteinen enthalten 784 Titan. Daher ist auch der Titangehalt der Erde recht bedeutend. Nach den Berechnungen von Clarke ist er ungefähr doppelt so groß als der von Kohlenstoff. Am häufigsten tritt das Titan in Form von Titanit, Ilmenit, Rutil und Perowskit auf. Gern kommt es zusammen mit Eisenerzen vor. Oft vertritt es das Silizium mehr oder weniger vollständig in seinen Verbindungen. Auch mit dem Thor und den seltenen Erden ist es manchmal vergesellschaftet. Die Verwandtschaft des Titan mit dem Silizium, Zirkonium, Thorium, Zinn usw. spricht sich darin aus, daß manche ihrer Verbindungen untereinander isomorph sind.

Das aus den Titanmineralien hergestellte Titan spielt zurzeit eine große Rolle bei der Herstellung gewisser Stahlsorten.

2. Beschreibung der Mineralien. 2a) Oxyde. Das Titandioxyd kommt in der Natur in 3 Modifikationen vor, die, nach den Refraktionskonstanten zu urteilen, untereinander metamer sind. Zwei von ihnen kristallisieren tetragonal, nämlich der Rutil und Anatas, während der Brookit zum rhombischen Kristallsystem gehört. Von den 3 Mineralien ist der Rutil am häufigsten und wahrscheinlich bei allen Temperaturen und Drucken am beständigsten. Brookit und Anatas wandeln sich daher häufig in ihn um. Der Rutil ist nie genau nach der Formel TiO_2 zusammengesetzt, denn er enthält immer Eisenoxyd, gelegentlich bis zu 14%. Er kristallisiert, wie gesagt, tetragonal holoedrisch. Das Achsenverhältnis a : c ist gleich 1 : 0,6442. Sehr gern bildet der Rutil knieförmige Zwillinge, auch Viellinge kommen oft vor. Seine Dichte beträgt 4,2 bis 4,3, die Doppelbrechung ist stark und positiv, der Pleochroismus recht deutlich. Das Mineral spaltet gut nach (110), schlechter nach (101). Es hat einen muschligen Bruch, eine Härte von 6 bis 6,5, metallartigen Diamantglanz. Es ist nur in dünner Schicht durchsichtig und blutrot bis braunrot, gelegentlich auch schwarz gefärbt. Dagegen ist der künstlich durch Sublimation, oder aus dem Schmelzfluß hergestellte Rutil farblos. Beim natürlichen wird die Farbe wahrscheinlich durch das Eisenoxyd, oder andere Metalloxyde verursacht. Der Rutil kommt hauptsächlich in kristallinen Schiefern, Phylliten und Tonschiefern vor. In den letzteren bildet es mikroskopisch feine Nädelchen.

Das Achsenverhältnis des gleichfalls tetragonalen Anatas ist: a : c = 1 : 1,7771. Auch in dieser Modifikation findet sich das Titandioxyd nie rein in der Natur, sondern ist immer durch Eisenoxyd, Tonerde usw. verunreinigt. Der Anatas ist schwarz, blau, gelb oder braun gefärbt und besitzt einen metallartigen Diamantglanz. Seine Dichte beträgt 3,83 bis 3,97, die Härte 5,5 bis 5,6. Die Doppelbrechung ist negativ und der Pleochroismus recht stark. Die immer nur kleinen Anataskristalle kommen auf Klüften im Granit, Gneis usw. häufig zusammen mit Quarz, Eisenglanz, Brookit, Rutil usw. vor.

Der Brookit kristallisiert rhombisch (a : b : c = 0,8416 : 1 : 0,9444). Die Kristalle sind gewöhnlich tafelig nach (100) ausgebildet und vertikal gestreift. Die Härte liegt zwischen 5 und 6. Die Dichte beträgt 4,14. Die Doppelbrechung ist positiv und der Pleochroismus schwach. Der Brookit hat wie der Anatas einen metallartigen Diamantglanz und auch für seine Zusammensetzung und sein Vorkommen gilt das gleiche wie bei jenem Mineral.

Dem Rutil sehr nahe steht der gleichfalls tetragonale Strüverit, (a: c = 1:0,6456) der sich durch einen hohen Niob- und Tantalgehalt auszeichnet. Seine Zusammensetzung gibt die Formel: $Te(Ta, Nb)_2O_8 + 6\ TiO_2$ ziemlich gut wieder. Der Struverit kommt in Pegmatiten vor, hat eine eisenschwarze Farbe und die Härte 6 bis 6,5.

2b) Ferrite. Zu dieser Gruppe gehört als einziger Vertreter der Titanomagnetit, der aber auch nicht als selbständiges Mineral aufzufassen ist, sondern als ein stark Titanhaltiges Magneteisen; denn seine Eigenschaften stimmen mit denen des Magnetit, auf den ich hiermit verweise, praktisch überein.

2c) Ortotitanate. Der Pseudobrookit hat seinen Namen daher, weil er dem Brookit sehr ähnlich ist. Er kristallisiert wie dieser rhombisch und die Kristalle sind ebenfalls tafelig ausgebildet und gestreift. Die Zusammensetzung des Pseudobrookit wird ungefähr durch die Formel $Fe_4(TiO_4)_3$ wiedergegeben. Er wird also aufgefaßt als ein Fe-Salz der Titansäure. In dieser Gruppe ist auch der Melanit zu erwähnen, denn dessen Si ist gelegentlich durch Ti ersetzt. Seine Eigenschaften sind bei den Granaten näher behandelt.

2d) Metatitanate. Zu den Metatitanaten gehört eine ganze Reihe wichtiger Mineralien. Eines der bemerkenswertesten ist der Perowskit. Er kristallisiert scheinbar regulär, denn er bildet gewöhnlich

würfelig, gelegentlich auch oktaedrisch gestaltete Kristalle. Aetzfiguren und Doppelbrechung beweisen aber, daß das Mineral zweiachsig und wahrscheinlich rhombisch ist. Chemisch ist der Perowskit Kalziummetatitanat ($CaTiO_3$). Seine Zusammensetzung schwankt ziemlich wenig. Die Härte beträgt 5 bis 6, der Glanz ist diamantartig. Das Mineral spaltet nach den scheinbaren Würfelflächen. Es kommt vor in Talkschiefern und Nephelin-Leuzit-Basalten. Der Knopit unterscheidet sich von dem Perowskit nur durch seinen Cer-gehalt. Er ist kontaktmetamorpher Entstehung.

Als Ilmenitgruppe faßt man gewöhnlich die Metatitanate des Fe, Mn, Mg und Pb zusammen. Sie kristallisieren hexagonal rhomboedrisch und enthalten immer mehr oder minder große Mengen Fe_2O_3. Das Magnesiumsalz ($MgTiO_3$) trägt den Namen Geikielith (a : c = 1 : 1,379) und kommt zusammen mit Korund, Turmalin, Ilmenit usw. in den Edelsteinsanden auf Ceylon vor. Der Geikielith ist ein seltenes Mineral und das gleiche gilt vom Pyrophanit ($MnTiO_3$), und dem Senait (Fe, Mn, Pb) TiO_3. In ihren Eigenschaften sind die 3 Mineralien einander recht ähnlich. Sie spalten gut und haben eine dunkle Farbe. Viel wichtiger als sie ist der auch hexagonal-rhomboedrische Ilmenit, der auch noch den Namen Titaneisen trägt (a : c = 1 : 1,385). Seine Zusammensetzung ist schwankend. Im allgemeinen stimmt am ehesten die Formel $(FeTi)_2O_3$. Ueber die Art, wie diese Formel aufzufassen ist, hat man sich lange gestritten. Heute spricht am meisten dafür, den Ilmenit als eine Mischung von Eisenmetatitanat ($FeTiO_3$) und Fe_2O_3 anzusehen. Er bildet tafelige Kristalle, die häufig verzwillingt sind. Der Bruch ist muschlig, die Härte = 5 bis 6, das spezifische Gewicht = 4,6 bis 5,2. Die Kristalle haben eine eisenschwarze Farbe und zeigen auf frischem Bruch Metallglanz. Sie sind nur ganz schwach magnetisch. Der Ilmenit kommt als Uebergemengteil in sauren und basischen Eruptivgesteinen häufig vor, aber auch in Gneisen und Glimmerschiefern ist er verbreitet. Er ist ziemlich leicht zersetzlich und geht oft in Titanit über.

Auch das reine Eisenmetatitanat ($FeTiO_3$) kommt in der Natur vor und ist unter dem Namen Crichtonit bekannt. Es ist allerdings viel seltener als der Ilmenit, dem es in der Ausbildung der Kristalle so ähnelt, daß es oft gar nicht als selbständiges Mineral angeführt wird. Zu den Metatitanaten stellt man wohl auch am besten den Arizonit, der wahrscheinlich monoklin kristallisiert und ungefähr nach der Formel $Fe_2Ti_3O_9$ zusammengesetzt ist. Er wurde zusammen mit Gadolinit in einem Pegmatitgang in Arizona gefunden. Delorenzit, Astrophyllit, Yttrokrasit sind bei den Mineralien der seltenen Erden behandelt. Endlich ist hier noch zu erwähnen, daß Augite und Hornblenden oft Ti-haltig sind.

2e) Silicotitanate. Das wichtigste Mineral dieser Gruppe ist der monoklin prismatische Titanit (a : b : c = 0,7547 : 1 : 0,8543 $\beta = 119^0 43'$). Er wird auch Sphen oder Leukoxen genannt. Seine Zusammensetzung gibt die Formel $CaTiSiO_5$ recht gut an. Die Kristalle sind meist flach briefkuvertförmig, haben einen muscheligen Bruch, die Härte 5 bis 5,5 und das spezifische Gewicht 3 bis 3,5. Gefärbt sind sie gelb, grün, braun oder rot. Der Charakter der Doppelbrechung ist positiv und der Pleochroismus deutlich. Der Titanit kommt in Eruptiv- und in metamorphen Gesteinen vor. Oft ist er in ihnen erst sekundär aus dem Ilmenit gebildet. Er selbst liefert bei seiner Umwandlung häufig Anatas und Rutil. Der Yttrotitanit ist eine an Yttererde reiche Varietät des Titanit. Auch der Greenovit ist nicht als selbständiges Mineral aufzufassen, sondern als ein Mn-haltiger Sphen. Der Tschewkinit ist ein zersetzter Titanit, der gelegentlich bedeutende Mengen von Thor, Cer usw. enthält. In Süd-Grönland bei Narsarsuk sind noch einige andere Silicotitanate gefunden worden, die aber alle selten sind. Am längsten ist der Neptunit bekannt. Er kristallisiert monoklin, enthält neben Si und Ti noch ziemlich viel Alkalien und Eisen und ist pneumatolytischer Entstehung. Mit ihm zusammen kommt gelegentlich der trigonale Benitoit, ein Baryumsilikotitanat, vor. Auch der monokline Leukosphenit ist Ba-haltig; außerdem sind ihm aber noch etwa 11% Na vorhanden. Im übrigen ist er dem Benitoit ziemlich nahe verwandt. Der Nasarsukit, erhielt den Namen nach seinem oben schon erwähnten Fundort. Er kristallisiert tetragonal und ist ein Na-reiches Si-Titanat. Die Kristalle sind gelb gefärbt, pleochroitisch und spalten gut. Auch der monokline Epistolit wurde in Südgrönland entdeckt und ist, worauf schon sein Gehalt an seltenen Erden hinweist, pneumatolytischer Entstehung. Aehnlich wie diese letzten Mineralien ist der rhombische Molengraaffit zusammengesetzt. Die Kristalle besitzen eine gelbe Farbe, Pleochroismus und positive Doppelbrechung. Sie wandeln sich in Titanit um. Der Rinkit endlich ist schon bei den seltenen Erden behandelt.

2f) Borotitanate. Hier ist nur eine Ti-Verbindung zu nennen: der Warwickit, in zersetztem Zustand auch Euceladit genannt. Er kristallisiert rhombisch und ist chemisch eine kompliziert zusammengesetzte Verbindung von Mg, Te, Ti, B, über deren

Konstitution man sich noch nicht klar ist. Vielleicht ist er auch als ein Borat anzusehen.

Literatur. ***P. Groth***, *Tabellarische Uebersicht der Mineralien (1898).* — ***A. Schwantke***, *Neue Mineralien, Fortschritte d. Mineralogie.* 1—3. — ***Doelter***, *Handbuch d. Mineralchemie.* 3, 1.

A. Ritzel.

Tod.

1. Charakteristik des Todes. 2. Die Erscheinungen der Nekrobiose. a. Die histolytischen Prozesse. b. Die metamorphotischen Prozesse. 3. Die Bedingungen des Todes. a. Die äußeren Bedingungen des Todes. b. Die inneren Bedingungen des Todes. 4. Die Frage nach der Unsterblichkeit. a. Die Frage nach der körperlichen Unsterblichkeit. b. Die Bedeutung des Todes. c. Die Frage nach der geistigen Unsterblichkeit.

1. Charakteristik des Todes. Der Begriff des Todes ist untrennbar mit dem Begriff des Lebens verknüpft. Nur durch seinen Gegensatz zum Begriff des Lebens gewinnt er seinen Inhalt. Beide Begriffe sind rein empirisch vom Menschen in prähistorischer Zeit auf Grund eines verhältnismäßig kleinen Kreises äußerlicher Beobachtungen am Menschen und den Tieren koncipiert. Man sah den Menschen und die höheren Tiere sich bewegen und athmen, man fühlte den Herzschlag und die Wärme, man kannte die Ernährung und Ausscheidung und man machte die Beobachtung, daß alle diese Vorgänge plötzlich aufhörten und daß der Mensch oder das Tier sich passiv verhielt und zerfiel wie ein Gebilde aus Lehm oder Erde. So entstanden aus der Beobachtung dieser gegensätzlichen Zustände die beiden gegensätzlichen Begriffe Leben und Tod, deren Gegensätzlichkeit frühzeitig noch gesteigert wurde durch die folgenschwere Hypothese, welche diesen plötzlichen Wechsel aus einem Punkte heraus erklären sollte, indem sie die Aeußerungen des Lebens als Wirkungen eines unsichtbaren oder doch äußerst feinen luftförmigen Agens ansah, der Seele, die im Körper wohnt und beim Tode denselben verläßt.

Die heutige Physiologie ist in der Analyse der beiden gegensätzlichen Zustände bedeutend tiefer gelangt. Freilich ist an eine abschließende Definition der Begriffe auch heute noch nicht zu denken, aber wir können doch die Begriffe so charakterisieren, daß sie das Wesen der beiden Zustände scharf und durchgreifend kennzeichnen. Leben ist beschränkt auf die Organismenwelt. Da der Begriff des Todes von Anfang an nur auf Körper Anwendung gefunden hat, die ursprünglich einmal lebendig waren, so erscheint es zweckmäßig, denselben ebenfalls auch heute zu beschränken auf die Organismenwelt und nicht ihn zu übertragen auf die anorganische Welt, die zwar leblos, aber nicht tot im wissenschaftlichen Sinne ist. Der lebendige Organismus unterscheidet sich von dem toten Organismus scharf durch den Besitz eines Stoff- und Energiewechsels. Das bedeutet im physiologischen Sinne nicht lediglich stoffliche oder energetische Veränderungen, sondern spezielle Veränderungen derart, daß andauernd aus einfacheren chemischen Verbindungen komplexere und zwar vor allen Dingen kompliziertere Eiweißkörper aufgebaut werden, die wieder zerfallen zu einfacheren und einfachsten Verbindungen, womit ein Energieumsatz verknüpft ist, der in der ersteren Phase der Prozesse zu einer Energieanhäufung, in der letzteren zu einer Energieabgabe führt. Ein solcher Stoff- und Energiewechsel fehlt dem toten Organismus.

Damit ist indessen noch nicht gesagt, daß jeder Organismus, der keinen Stoff- und Energiewechsel hat, tot ist. Seit der Entdeckung der Bärentierchen (Macrobioten) durch Leeuwenhoek wissen wir vielmehr, daß es bei vielen Organismen außer dem aktuellen Leben und dem Tode noch einen dritten Zustand des Organismenkörpers gibt, der von Claude Bernard als latentes Leben bezeichnet worden ist. Diese Organismen (Bärentierchen, Rädertierchen, Bakterien, Pflanzensamen usw.) gehen bei Wasserentziehung in einen Zustand über, in dem aller Stoff- und Energiewechsel stillsteht, d. h. in dem kein Leben mehr vorhanden ist. Dennoch sind sie in diesem Zustande des latenten Lebens nicht tot, denn bei erneuter Wasserzufuhr in ihre lebendige Substanz kehrt ihr Leben zurück. Sie sind also zwar leblos, aber nicht tot. Der tote Organismus muß daher noch schärfer charakterisiert werden dadurch, daß in ihm der Stoff- und Energiewechsel irreparabel erloschen ist.

Die Zustände des latenten Lebens kommen aber nur bei wirbellosen Tieren und Pflanzen vor. Der Zustand des Scheintodes beim Menschen hat nichts mit ihnen zu tun. Beim scheintoten Menschen handelt es sich nicht um einen vollkommenen Stillstand des Stoff- und Energiewechsels, sondern nur um eine Herabsetzung der sichtbaren Lebensäußerungen, die unter Umständen so stark sein kann, daß durch eine oberflächliche Untersuchung kein Lebenszeichen mehr konstatierbar ist. In früherer Zeit, wo die Untersuchung nicht immer tiefgehend war, konnte daher gelegentlich ein scheintoter Mensch für tot gehalten werden. Eine gewissenhafte Untersuchung wird aber heute immer den Eintritt des Todes konstatieren können am völligen Stillstand des Herzens und

dem Fehlen der Zirkulation, an dem Aufhören der Atembewegungen, an der Abkühlung des Körpers, an dem Eintritt der Totenstarre, an dem Erscheinen der Leichenflecke usw. In einem zweifelhaften Falle kann immer ein Zeitraum von wenigen Tagen die sichere Entscheidung gestatten.

Dagegen ergeben sich unüberwindliche Schwierigkeiten, sobald man versucht, einen bestimmten Moment als den Moment des Todes zu fixieren. Gewöhnlich gilt als der Moment des Todes beim Menschen der Moment, in dem das Herz für immer still steht. Allein zu dieser Zeit sind andere Organe durchaus noch lebendig. Ja sogar das Herz selbst braucht noch nicht tot zu sein. Es gelang Kuliabko, die Herzen von Kindern noch über 20 Stunden nach ihrem Stillstande in isoliertem Zustande durch eine künstliche Zirkulation mit einer Ringerschen Salzlösung wieder zum Schlagen zu bringen. Skelettmuskeln von Warmblütern konnte Mangold, nachdem sie herausgeschnitten in physiologischer Salzlösung aufbewahrt waren, noch nach 55 Stunden durch elektrische Reize zur Kontraktion veranlassen. Flimmerepithelien und Leukocyten lassen sich unter geeigneten Bedingungen ebenfalls noch lange Zeit nach dem Tode lebendig erhalten. Die einzelnen Organe und Gewebe sterben also nicht gleichzeitig in einem bestimmten Moment, sondern allmählich nacheinander. Das gilt für alle Organismen. Selbst bei der einzelnen Zelle kann man feststellen, daß nach einem tödlichen Eingriff noch manche Teile eine Zeitlang weiter leben, während andere bereits zerfallen sind. Kurz, es ist nicht möglich, einen bestimmten Moment als den Moment des Todes zu bezeichnen. Es besteht vielmehr ein allmählicher Uebergang vom intakten Leben zum definitiven Stillstand aller Lebensäußerungen. Der Tod entwickelt sich. Diese Zeit der Entwickelung des Todes aus dem intakten Leben irgendeines Organismus ist die Zeit der „Nekrobiose" oder des Sterbens.

Die Dauer der Nekrobiose kann sehr verschieden sein. Sie kann, wie bei plötzlicher Abtötung eines kleineren Organismus wenige Sekunden dauern, sie kann aber auch wie bei unheilbaren Krankheiten sich über Jahre erstrecken. Ihr Beginn läßt sich nicht mathematisch genau fixieren. Bei einem Organismus, der eines natürlichen Todes stirbt, geht das intakte Leben kontinuierlich in die Periode der Nekrobiose und weiterhin in den Tod über.

2. Die Erscheinungen der Nekrobiose. Während der Zeit der Nekrobiose machen sich im Leben der Organe, Gewebe und Zellen mehr und mehr Veränderungen bemerkbar, die in bestimmten mikroskopischen Vorgängen ihren Ausdruck finden. Unter diesen mikroskopischen Prozessen, wie sie sich beim Alterstod oder bei Krankheitsvorgängen entwickeln, kann die histologische Untersuchung verschiedene Typen unterscheiden. Bei der einen Gruppe von nekrobiotischen Prozessen zerfällt allmählich die lebendige Substanz der Zelle, so daß die lebendige Masse immer mehr abnimmt. Das sind die histolytischen Prozesse. Bei der anderen Gruppe schlägt der normale Stoffwechsel zunächst perverse Bahnen ein, so daß Stoffe in der Zelle sich anhäufen, die ihrem normalen Leben fremd sind. Das sind die metamorphotischen Prozesse.

2a) Die histolytischen Prozesse. Bei diesen Prozessen nimmt das nekrobiotische Gewebe mehr und mehr an Masse ab. Die einfachste Form ist daher die Atrophie, die in einem allmählichen Schwund des betroffenen Teiles besteht. Die senile Atrophie der Haut, der Knochen, der Muskeln und ebenso innerer Organe ist das Paradigma dieser Prozesse, die sich aber auch bereits im jugendlichen Alter unter pathologischen sowohl wie unter physiologischen Verhältnissen abspielen können. Bei Durchreißung eines motorischen Nerven tritt eine Inaktivitätsatrophie der von ihm versorgten Muskeln ein, wenn nicht die Verbindung der Nervenenden durch den Heilungsprozeß wieder hergestellt wird. Infolge einer Unterbrechung der Blutversorgung eines Gehirnteils durch Bersten eines Gefäßes kann eine Atrophie der betreffenden Region entstehen. Unter physiologischen Verhältnissen sehen wir atrophische Prozesse sehr häufig in der normalen Entwickelung der Tiere. Ganze Organe und Organsysteme, wie z. B. der Schwanz der Froschlarve mit allen seinen Muskeln, Gefäßen, Nerven usw. sterben ab und werden einfach resorbiert. Auch beim Menschen sehen wir die Thymusdrüse bereits im Kindesalter, die Geschlechtsdrüsen im mittleren Lebensalter atrophischen Prozessen unterliegen. In vielen Fällen verläuft die Histolyse unter Wasseraufnahme seitens der Gewebezellen aus der Lymphe und dem Blut und schließlich unter Verflüssigung der Zellen selbst. Das ist besonders der Fall bei akuten Histolysen, wie z. B. bei der Verbrennung und der Entstehung von Brandblasen. Eine sehr häufige Form des Absterbens der Zellen ist der körnige Zerfall, wie man ihn namentlich bei einzelligen Organismen beobachten kann. Wird eine Infusorienzelle durch einen Schnitt unter dem Mikroskop so geteilt, daß das eine Teilstück den Zellkern erhält, während das andere kernlos ist, so regeneriert sich das kernhaltige Teilstück, während das kernlose dem unabwendbaren Tode verfällt. Hier kann man die Nekrobiose unter dem Mikroskop im Verlauf einiger Stunden verfolgen. Das kernlose

Teilstück verhält sich nach Ueberwindung eines durch die Operation bedingten Erregungsstadiums, in dem die Wimpern in heftigster Weise schlagen, zunächst vollkommen normal. Die Wimpern sind in derselben Weise tätig wie bei diesem Körperteil, wenn er noch im intakten Zusammenhange mit dem übrigen Zellkörper ist. Allmählich wird der Wimperschlag langsamer und einzelne Wimpern beginnen unregelmäßig zu schlagen. Es treten bei ihnen Pausen ein zwischen den einzelnen Schlägen, während andere Wimpern, besonders solche, die in langen Reihen eng aneinander geordnet stehen, wie z. B. die Peristomwimpern, noch rhythmisch und metachron weiterschlagen. Dann beginnt das Protoplasma an einer Stelle zu zerfallen. Der scharfe Oberflächenkontur verschwindet und das Protoplasma löst sich in eine schleimig-körnige Masse auf. Dieser körnige Zerfall schreitet weiter und weiter vorwärts, befällt eine Wimper nach der anderen und bringt sie für immer zum Stillstand. So kann man in diesen interessanten Fällen unter dem Mikroskop direkt sehen, wie der Tod langsam über die Zelle hinschleicht, Teilchen nach Teilchen ergreifend und mitten aus seiner rastlosen Bewegung heraus zur ewigen Ruhe zwingend. Der Prozeß kann sich über Tage erstrecken, aber in anderen Fällen verläuft er akut und kriecht in wenigen Sekunden über die Zelle dahin, wie der Funke über die Zündschnur, nur zerfallene Massen hinter sich lassend.

2b) *Die metamorphotischen Prozesse.* Diese Prozesse haben das Gemeinsame, daß bei einem in der Regel chronischen Verlauf in der Zelle Stoffe angehäuft werden, die ihr sonst fremd sind, bis schließlich der Tod der Zelle erfolgt. Als Paradigma dieser metamorphotischen Prozesse kann die *Fettmetamorphose* gelten, bei der sich in der Zelle zunächst kleine Fetttröpfchen im Protoplasma anhäufen, die an Größe zunehmen, untereinander verschmelzen und schließlich große Fettmassen bilden, während das Protoplasma mehr und mehr verschwindet und schließlich zerfällt. Eine solche Fettmetamorphose kommt in ziemlich akuter Form unter physiologischen Verhältnissen in den Zellen der Brustdrüse während der Laktationsperiode vor. Auch hier zerfallen die Zellen unter enormer Fettanhäufung und das Produkt des Zerfalls mit Lymphe gemischt liefert die Milch. In pathologischen Fällen tritt die Fettmetamorphose in Geweben auf, deren Zellen normalerweise niemals Fett ablagern, wie z. B. im Herzmuskel, in der Niere, den Lympfdrüsen usw. In dem Maße wie diese lebenswichtigen Organe durch die Fettmetamorphose ihrer Zellen funktionsunfähig werden, leiden auch die übrigen Körperteile, bis ein harmonisches Zusammenwirken derselben nicht mehr möglich ist und der Tod erfolgt. Wie bei der Fettmetamorphose das Fett, so wird bei der *Schleimmetamorphose* der Schleim in Zellen abgelagert, die sonst keine Schleimanhäufung zeigen. So gehen z. B. Epithelzellen infolge von Schleimmetamorphose bei starken Katarrhen zugrunde. Auch eine *Verkalkung* der Zellen tritt häufig ein. Die Zelle wird dabei gewissermaßen versteinert, indem kleine Kalkkörnchen mehr und mehr ihre lebendige Substanz ersetzen. Das ist namentlich der Fall in den Zellen der Gefäßwände bei der Arteriosklerose und gelegentlich in den Ganglienzellen des Gehirns bei Verblödung. Bei der *Amyloidmetamorphose* schließlich verläuft der Prozeß insofern anders, als hier die Amyloidsubstanz, eine Glykoproteïd, von den Zellen der Gefäßwände ausgeschieden und zwischen den Zellen abgelagert wird, so daß allmählich die Zellen durch diese Amyloidmassen erdrückt werden. Solche Amyloidmetamorphosen, die schließlich zur wachsartigen Degeneration der Organe führen, werden bei langdauernden chronischen Krankheiten, namentlich in der Niere, Milz und den Lymphdrüsen beobachtet.

Die Mannigfaltigkeit der histolytischen und metamorphotischen Prozesse der Nekrobiose ist mit diesen Beispielen keineswegs erschöpft. Die Nekrobiose verläuft je nach der spezifischen Beschaffenheit der Zellen und Gewebe verschieden und es ist hier eine unabsehbare Fülle von speziellen Formen des Absterbens in der Natur verwirklicht.

3. Die Bedingungen des Todes. Es entsteht nunmehr die Frage, von welchen Faktoren der Eintritt des Todes bei einem lebendigen System abhängig ist. Dieses Problem hat seit langer Zeit eine lebhafte Diskussion hervorgerufen, die auch heute noch nicht ihr Ende gefunden hat. Der Beantwortung der Frage hat vielfach der Umstand große Schwierigkeiten in den Weg gelegt, daß man auch hier wie in so vielen Problemen der Biologie wieder nach „der Ursache" des Todes gesucht hat, statt nach den verschiedenen Bedingungen für das Sterben, und so sind sich schon frühzeitig zwei Anschauungen gegenübergetreten, von denen die eine die Ursache des Todes in den vom umgebenden Medium her auf das lebendige System einwirkenden Schädigungen, die andere in inneren, im lebendigen System selbst gelegenen Faktoren erblickt hat. Es läßt sich nicht leugnen, daß beide Anschauungen in gewissem Grade zutreffend sind, aber keine in ihrer extremen Einseitigkeit. Die Verhältnisse liegen etwas komplizierter.

3a) *Die äußeren Bedingungen des Todes.* Es ist selbstverständlich keine Frage, daß jeder Wegfall einer äußeren

Lebensbedingung irgendeines Organismus zu seinem Tode führen muß. Entziehung der Sauerstoffzufuhr aus dem umgebenden Medium führt bei jedem aëroben Organismus zum Tode des Erstickens. Mangel an Nahrung führt zum Hungertode. Ebenso kann Wasserentziehung, Herabsetzung oder Erhöhung der Temperatur über eine gewisse Grenze, Aenderung des osmotischen oder des statischen Druckes den Tod im Gefolge haben. Auch der Hinzutritt neuer, fremder Faktoren, wie eines starken elektrischen Stromes, oder eines chemischen Agens kann zur äußeren Todesbedingung werden. Auch kann der schädigende Faktor so schwach und lange einwirken, daß er nur ganz allmählich, im Laufe von vielen Jahren das Absterben mit sich bringt, wie chronische Vergiftungen durch Alkohol, Nikotin, Arzneimittel usw. Daß alle diese äußeren Faktoren ebensoviele äußere Todesbedingungen vorstellen, unterliegt keinem Zweifel. Eine ganz andere Frage aber ist es, ob der Tod in jedem Falle ausschließlich eine Folge solcher äußeren Schädigungen ist. Die Theorie von den äußeren Todesursachen in ihrer extremen Form vertritt diese Ansicht. Sie sagt, daß während des ganzen Lebens andauernd zahllose kleine Schädigungen einwirken, die zwar an sich so gering sind, daß ihre Wirkungen im einzelnen nicht bemerkbar werden, die aber doch durch Summierung allmählich zu so starken Störungen im Zusammenleben der einzelnen Organe führen, daß schließlich ein harmonisches Zusammenleben nicht mehr möglich ist und der Tod eintritt. Nach dieser Auffassung ist also der Tod lediglich eine Folge schwacher, chronischer Reizwirkungen. In dieser Einseitigkeit ist die Theorie von den äußeren Todesursachen in neuerer Zeit mehr und mehr verlassen worden. Besonders Cohnheim hat auf zahlreiche große Schwierigkeiten aufmerksam gemacht, die dieser Auffassung erwachsen. Wenn diese Theorie richtig wäre, müßte man erwarten, daß Menschen, die ein besonders regelmäßiges Leben geführt haben und sich vor äußeren Schädlichkeiten möglichst bewahrt haben, auch ein höheres Alter erreichen müßten, als Menschen, die während ihres Lebens vielen äußeren Schädigungen ausgesetzt waren. In dieser Hinsicht besteht aber durchaus keine Gesetzmäßigkeit. Das Alter des Menschen geht auch bei möglichstem Ausschluß aller äußeren Schädlichkeiten nicht über eine gewisse Grenze hinaus. Menschen mit einem Alter von mehr als hundert Jahren gehören schon zu den größten Seltenheiten. Betrachtet man aber diesen Punkt vergleichend im Tierreich, so zeigen sich namentlich bei niederen Tieren, z. B. bei den Insekten noch viel geringere individuelle Schwankungen in der Lebensdauer. Jede Insektenform hat für alle Individuen nahezu die gleiche Lebensdauer, die oft so kurz ist, daß kaum die Zeit bleibt für die Einwirkung einer genügenden Menge von Schädigungen. Cohnheim macht noch auf eine andere Schwierigkeit aufmerksam. Wäre der Tod beim Menschen lediglich das Endergebnis einer Summation solcher Schädigungen, so wäre zu erwarten, daß der Tod im Greisenalter je nach der Art dieser Schädigungen in ganz verschiedener Form auftreten würde. Statt dessen beobachtet man in den senilen Veränderungen, die zum Tode führen, eine auffallende Konstanz, ganz gleichgültig, ob der betreffende Mensch immer gesund oder oft krank war, und ganz gleichgültig, welche Schädigungen er erlebt und welche Art von Krankheiten er durchgemacht hat. So zeigt sich die senile Atrophie im Schwinden des Unterhautbindegewebes, im Brüchigwerden der Knochen, im Weißwerden und Ausfallen der Haare, im Schwund der Muskeln und Drüsen usw. ganz unabhängig von der Art der früher erlebten Schädigungen. Das alles spricht durchaus gegen die Lehre von den äußeren Todesursachen in ihrer extremen Einseitigkeit.

3b) Die inneren Bedingungen des Todes. Auf Grund obiger Tatsachen haben Cohnheim, S. Minot, Verworn und andere die Anschauung vertreten, daß der Tod eine Entwickelungsphase ist, wie andere Entwickelungsstadien. Der physiologische Tod entwickelt sich, auch wenn keine äußeren Schädigungen einwirken, so wie sich der Organismus überhaupt dauernd entwickelt. In der Entwicklung der Organismen gibt es keinen Stillstand. Von der Eizelle bis zur Leiche spielen sich ununterbrochen Veränderungen ab. Führen diese Veränderungen allmählich zu Störungen in dem harmonischen Zusammenarbeiten der einzelnen Teile, die durch die Selbstregulationsmechanismen des Organismus nicht mehr kompensiert oder durch neue Kompromisse zwischen den Teilen ausgeglichen werden können, so tritt der Tod ein. Der Tod ist nur das letzte Endglied der langen Entwickelung. Die inneren Bedingungen des Todes liegen also in den Entwickelungsveränderungen des Organismus.

Allein es wäre ebenso falsch, für den Eintritt des Todes nur die innerhalb des Organismus gelegenen Faktoren verantwortlich zu machen, wie es falsch ist, den Tod allein aus äußeren Faktoren herleiten zu wollen. Die Entwickelung ist ebenso bedingt durch die innerhalb wie durch die außerhalb des lebendigen Systems gelegenen Momente. Nur in der Wechselwirkung zwischen beiden besteht die Entwickelung, besteht das Leben überhaupt. Was wir mit einem kurzen Worte als Leben bezeichnen, ist in Wirklichkeit der Ausdruck zahlloser innerer und äußerer

Faktoren, die miteinander in Wechselbeziehungen stehen und daher ebensoviele Lebensbedingungen vorstellen. Kein Leben ohne Entwickelung und da auch der Tod ein Entwickelungsstadium ist, so ist auch der Tod wie alle Entwickelung und wie alles Leben, dessen letzter Akt eben das Sterben bildet, in gleicher Weise bedingt durch äußere, wie durch innere Faktoren.

Von diesem Standpunkt aus verliert ein Problem, das man vielfach behandelt hat, seinen Wert. Es ist die Frage nach den speziellen Faktoren, die den physiologischen Tod herbeiführen. Man hat auf diese Frage viel Mühe und Studium verwendet. Götte hat die unmittelbare Ursache des Alterns und des Todes in der Abnutzung des Organismus durch die Produktion der Fortpflanzungszellen gesucht. Osler sieht die unmittelbaren Faktoren für den Tod in den Veränderungen des Gefäßsystems. Metschnikoff glaubt, daß die Länge unseres Dickdarms an unserem Altern und unserem Tode schuld sei, indem der Dickdarm als Sitz umfangreicher Fäulnisprozesse die Quelle für eine andauernde Autointoxikation des Menschen bilde. Auch therapeutische Vorschläge für eine Makrobiotik sind sofort auf diese Theorie gegründet worden, z. B. von Metschnikoff selbst, der empfiehlt, den Dickdarm durch Yoghurtmilchkuren mit einer anderen und zwar unschädlichen Bakterienflora zu bevölkern, und ferner von einzelnen Chirurgen, die empfehlen, den Dickdarm zu exstirpieren.

Stellt man sich auf den Standpunkt, daß die Nekrobiose und der Tod normale Entwickelungsstadien sind, dann hat es überhaupt keinen Sinn, einen speziellen Faktor als die „Ursache" des Todes zu bezeichnen. In der Entwickelung greifen die einzelnen Faktoren so eng ineinander und folgen die einzelnen Phasen so notwendig aufeinander und auseinander, daß es verkehrt wäre, ein einzelnes Moment zu isolieren und als „Ursache" des Todes anschuldigen zu wollen. Wie jedes Entwickelungsstadium ist auch der Tod bedingt, durch das vorhergehende, so wie dieses wieder bedingt ist durch ein früheres Entwickelungsstadium mit allen seinen zahllosen ineinandergreifenden Abhängigkeitsverhältnissen. Der Keim des physiologischen Todes liegt also wie der Keim jeder der unendlich vielen aufeinander folgenden Entwickelungsstadien immer in der ganzen vorhergehenden Entwickelung und es wäre rein willkürlich, aus der Fülle der sämtlichen voneinander abhängigen Partialglieder ein einziges herauszugreifen, um es als „Todesursache" zu denunzieren.

4. Die Frage der Unsterblichkeit. Wenn der Tod als ein normales Entwickelungsstadium aufgefaßt werden muß, das dadurch zustande kommt, daß die einzelnen Teile des Organismus bei ihren fortdauernden Entwickelungsveränderungen schließlich zu einem harmonischen Zusammenarbeiten unfähig werden, so liegt die Frage nahe, ob denn der Tod eine im Organismus begründete Notwendigkeit ist. Könnte die Entwickelung nicht unter gewissen Bedingungen so verlaufen, daß eine solche Disharmonie im Zusammenwirken der Teile entweder nicht zustande käme oder sobald sie erreicht wäre, durch einen Regulationsmechanismus, wie der Organismus ihn für so zahllose andere Fälle besitzt, wieder ausgeglichen würde? In diesem Falle würde der Tod keine unabwendbare Notwendigkeit sein. Solche Organismen wären physiologisch unsterblich.

4a) Die Frage nach der körperlichen Unsterblichkeit. Die Erfahrung zeigt, daß alle Metazoen und alle Metaphyten, also kurz alle vielzelligen Organismen, die aus differenzierten Zellenstaaten bestehen, auch unabwendbar dem Tode verfallen. Allein bei genauerer Betrachtung zeigt sich, daß nicht alle Zellen des Zellenstaates diesem Schicksale erliegen. Auch im differenzierten Zellenstaat gibt es bestimmte Zellen, die nicht an der Nekrobiose teilnehmen, sondern unter physiologischen Bedingungen am Leben bleiben und neue Individuen aus sich hervorgehen lassen, das sind die Geschlechtszellen. Die lebendige Substanz der Geschlechtszellen aller heute lebenden Organismen stammt in direkter lückenloser Deszendenz ab von der ersten lebendigen Substanz, die überhaupt auf der Erdoberfläche erschienen ist. Nirgends in dieser unübersehbar langen Reihe von Generationen hat der Tod das Leben dieser „Keimsubstanz" unterbrochen. In der Keimsubstanz der Geschlechtszellen ist der Zusammenhang des Lebens, wie zuerst Gustav Jäger und später Weismann betont haben, kontinuierlich. Was im differenzierten Zellenstaate stirbt, ist nur die Summe der „somatischen" Zellen. Diese bilden beim physiologischen Tode des Organismus die Leiche.

Bei den Protisten, das heißt bei den einzelligen Protozoen und Protophyten ist das Verhältnis anders. Diese sind, wie Weismann sagt, in Wirklichkeit physiologisch unsterblich. Hier wird die Kontinuität des Lebens durch den Gesamtorganismus erhalten, indem der einzellige Körper sich durch einfache Zellteilung fortpflanzt. Bei der Zellteilung entsteht keine Leiche. Vom Tod aber kann man nach Weismanns Auffassung nur da sprechen, wo eine Leiche ist. Demnach kann der Zellteilungsakt nicht mit dem Tode verglichen werden, und die einzelligen Organismen sind daher als unsterblich anzusehen.

Gegen diese Anschauung Weismanns sind mehrfache Einwände erhoben worden. Man hat gesagt: bei der Fortpflanzung durch Teilung müsse man trotzdem vom Tode des Individuums sprechen, wenn auch keine Leiche dabei resultiere, denn das Individuum als solches geht bei dem Zellteilungsakt zugrunde. Man sieht, daß es sich hierbei lediglich um einen Wortstreit handelt, bei dem die Begriffe „Tod" und „Unsterblichkeit" in verschiedenem Sinne gefaßt werden. Präziser würde man daher das, was Weismann Unsterblichkeit nennt als „Kontinuität des Lebens und der lebendigen Substanz" bezeichnen. Man hat aber ferner auch gegen Weismanns Schluß, daß der Tod nicht notwendig durch die Entwickelung des lebendigen Systems bedingt sei, da ja bei den Einzelligen durch jede Zellteilung immer wieder der jugendliche Zustand hergestellt und die Vorgänge des Alterns wieder repariert würden, den Einwand erhoben, daß auch bei den Einzelligen im Laufe vieler Generationen sich Alterserscheinungen entwickeln, die schließlich bei fortgesetzter Zellteilung zum Tode führen, wenn nicht durch den Akt der Konjugation mit einem anderen Individuum eine Verjüngung eingeleitet wird. So hat Maupas beobachtet, daß Paramäcien sich durch Hunderte von Generationen einfach auf dem Wege der Teilung fortpflanzen können, daß aber schließlich sich gewisse Altersveränderungen im Körper entwickeln, die, wenn man die Individuen immer wieder isoliert und dadurch an der Konjugation verhindert, schließlich unvermeidlich den Tod mit sich bringen. Durch den Konjugationsakt kann dieses Ende verhindert werden und neue lange Reihen von Generationen können aus den durch Konjugation verjüngten Individuen auf dem Wege der Zellteilung hervorgehen. Bei der Konjugation aber, die Richard Hertwig speziell bei Paramäcien sehr eingehend studiert hat, gehen große Teile des ursprünglichen Zellkörpers, wie z. B. der ganze Makronukleus zugrunde und werden einfach als Nahrungsmaterial resorbiert. Indessen die neueren Untersuchungen von Woodruff haben diese Einwände gegen Weismanns Auffassung vollständig entkräftet. Woodruff hat gezeigt, daß, wenn man die aus der Teilung des Paramäcienkörpers hervorgehenden Individuen immer wieder isoliert und immer wieder in ein frisches Nährmedium von geeigneter Zusammensetzung bringt, auch nach vielen Tausenden von Generationen keinerlei Alterserscheinungen auftreten, so daß wir heute mit größter Wahrscheinlichkeit sagen dürfen, daß das Altern, welches im Laufe einer langen Reihe von Generationen in ein und demselben Kulturmedium beobachtet wird, nicht durch die Entwickelung an sich bedingt ist, sondern bei diesen einzelligen Organismen tatsächlich nur durch äußere Schädigungen, die allmählich vom Medium her einwirken. Vermeidet man diese, indem man jede Generation immer wieder unter geeignete äußere Bedingungen bringt, so sind die Einzelligen in der Tat unsterblich im Sinne Weismanns. Dabei ist allerdings im Auge zu behalten, daß es sich nur um eine Kontinuität des Lebens handelt. Die Moleküle, welche die lebendige Zelle zusammensetzen, sind schon nach kurzer Zeit nicht mehr dieselben wie vorher, denn im Stoffwechsel zerfällt die lebendige Substanz andauernd und baut sich wieder von neuem auf. Indem sie zerfällt, stirbt sie aber selbst im Sinne Weismanns, denn die Stoffwechselprodukte sind tote Leichenteile, die aus dem Organismus entfernt werden. So ist Leben und Tod hier auf das Engste ineinander verwoben und ohne Sterben, das heißt ohne Zerfall von lebendiger Substanz existiert auch kein Leben.

4b) Die Bedeutung des Todes. Vom Standpunkte dieser Erwägungen gelangt Weismann nunmehr zu folgender Auffassung vom Wesen des Todes. Der Tod ist eine Anpassungserscheinung, die sich erst im Laufe der Organismenentwickelung herausgebildet hat, als die Metazoen und Metaphyten aus den einzelligen Protisten hervorgingen. Daß er nicht mit dem Wesen der Entwickelung als einer solchen unbedingt notwendig verknüpft ist, zeigen die einzelligen Organismen. Hier, sagt Weismann, „war es nicht möglich, den normalen Tod einzurichten, weil Individuum und Fortpflanzungszelle noch ein und dasselbe waren; bei den vielzelligen Organismen trennten sich somatische und Propagationszellen, der Tod wurde möglich, und wir sehen, daß er auch eingerichtet wurde". Wenn bei dem vielzelligen Organismus nur eine Fortpflanzungszelle wirklich zur Fortpflanzung gelangt, so ist damit der Fortbestand der Art gewährleistet. Eine unbegrenzte Dauer des ganzen vielzelligen Individuums aber wäre „ein ganz unzweckmäßiger Luxus" der Natur, infolgedessen wurde sie durch die Selektion beseitigt und der Tod trat als zweckmäßigere Einrichtung an ihre Stelle.

4c) Die Frage nach der geistigen Unsterblichkeit. Schließlich entsteht noch die alte Frage nach der Unsterblichkeit der Seele. Die Vorstellung von dem Weiterleben der Seele nach dem Tode, die der Mensch einst in entlegenen prähistorischen Zeiten konstruiert hat, ist getreulich übernommen worden bis in unsere Tage. Die Frage nach der Berechtigung dieser Vorstellung hängt untrennbar zusammen mit der Frage nach dem Dualismus von Leib und Seele und gehört in das philosophische und speziell das erkenntnistheoretische Gebiet. Hier kann

nur die naturwissenschaftliche Grundlage dieser Frage erörtert werden und diese ist sehr einfach durch die Erfahrung gegeben. Wenn man unter Seele die Bewußtseinsvorgänge versteht, die sich bei einem Individuum abspielen, so muß die naturwissenschaftliche Forschung sagen, daß ein Hinausreichen der individuellen Bewußtseinsvorgänge über das Leben des Individuums nicht existiert. Vom Menschen, von dem allein wir sichere Erfahrungen über die subjektiven, das heißt die Bewußtseinsvorgänge besitzen, hat uns die wissenschaftliche Erfahrung des verflossenen Jahrhunderts gelehrt, daß die einzelnen Bewußtseinsvorgänge bedingt sind, durch ganz bestimmte Vorgänge in den histologischen Elementen der Großhirnrinde (vgl. den Artikel „Gehirn"). Hören diese Vorgänge auf, so fallen auch die entsprechenden Bewußtseinsvorgänge fort. Das ist eine durch tausendfache Erfahrung bestätigte, von keinem wissenschaftlichen Forscher mehr bezweifelte Tatsache. Beim Tode hören die spezifischen Vorgänge in den Elementen der Großhinrinde auf. Das Leben dieser sehr hinfälligen Elemente erlischt sehr schnell, sobald der Blutstrom aufhört zu zirkulieren. Dementsprechend erlischt das Bewußtsein. Mosso hat durch Experimente am Menschen gezeigt, daß bereits wenige Sekunden nach der Abklemmung der Carotiden, welche das sauerstoffhaltige Blut dem Großhirn hauptsächlich zuführen, vollkommene Bewußtlosigkeit entsteht. Das ist eine andere, von Niemandem mehr bestrittene Tatsache. Aus diesen beiden Tatsachen ergibt sich, daß von einer Fortexistenz des individuellen Bewußtseinslebens nach dem Tode des Individuums nicht mehr die Rede sein kann. Unsere Empfindungen, Gedanken und Gefühle leben nur in dem Sinne auch nach unserem Tode noch fort, als wir sie während unseres Lebens anderen Menschen mitgeteilt haben, die sie nun selbst in ihrem Bewußtseinsleben reproduzieren. Das ist die einzige Unsterblichkeit unserer Seele.

Literatur. ***Max Verworn,*** *Allgemeine Physiologie, V. Aufl., Jena 1909.* — ***Cohnheim,*** *Vorlesungen über allgemeine Pathologie. 2. Aufl. Berlin 1892.* — ***Ch. S. Minot,*** *Moderne Probleme der Biologie. Jena 1913.* — ***Weismann,*** *Ueber die Dauer des Lebens. Jena 1882.* — ***Derselbe,*** *Ueber Leben und Tod. Jena 1884.* — ***Woodruff,*** *Further Studies on the Life Cycle of Paramaecium. Biological Bulletin. Vol. XVII, 1909.*

Max Verworn.

Toepler

August Joseph Ignaz.

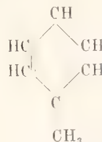
Geboren am 7. September 1836 in Brühl bei Bonn, gestorben am 6. März 1912 in Dresden. Er wurde 1859 Dozent der Chemie und Physik an der landwirtschaftlichen Akademie Poppelsdorf bei Bonn, 1865 Professor der Physik am Polytechnikum zu Riga, 1869 an der Universität Graz, 1876 an der technischen Hochschule zu Dresden, 1900 trat er in den Ruhestand. Toeplers Schlierenmethode dient zur Sichtbarmachung einer Reihe sonst nicht beobachtbarer Erscheinungen. Gleichzeitig mit Holly 1865 konstruierte er eine Influenzmaschine, deren Leistungsfähigkeit er 1886 durch Verwendung einer großen Anzahl von Scheiben erheblich steigerte. Er konstruierte ferner eine hahnlose hydrostatische Quecksilberpumpe, 1862, eine magnetische Wage für Erdmagnetismus 1883 und eine Drucklibelle 1895, unternahm dioptrische Untersuchungen und diamagnetische Messungen.

E. Drude.

Toluolgruppe.

1. Einleitung. 2. Aromatische Verbindungen mit gesättigten Seitenketten. 3. Aromatische Verbindungen mit ungesättigten Seitenketten. a) Aromatische Olefine, Styrolgruppe. b) Aromatische Acetylene.

1. Einleitung. Werden ein oder mehrere H-Atome des Ringsystems von aromatischen Kohlenwasserstoffen durch aliphatische Kohlenwasserstoffreste (die man als „Alkyle" oder „Alphyle" bezeichnet), ersetzt, so entstehen die verzweigten „Homologen" der „glatten" aromatischen Ringsysteme (s. den Artikel „Systematik und Nomenklatur der chemischen Verbindungen"). Die bekannteste in diese Gruppe gehörende Verbindung ist das Toluol, das sich aus dem „Aryl" (aromatischen Rest) C_6H_5 und dem „Alphyl" CH_3 zusammensetzt und die Konstitutionsformel



hat. Nach diesem Hauptrepräsentanten können wir die ganze Körperklasse als „Toluolgruppe" bezeichnen.

Faßt man den Begriff „aromatische Reihe" im weitesten Sinne auf, d. h. identifiziert man ihn mit dem Begriff „nichthydrierte iso-(carbo-) und heterocyklische Verbin-

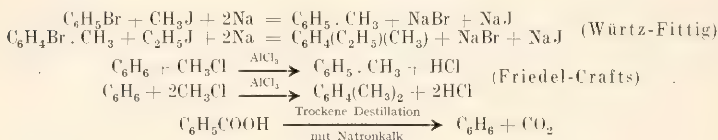
dungen", so ist die Gruppe des Toluols eine außerordentlich reichhaltige. Wir wollen hier nur eine kurze Uebersicht über die alkylierten Glieder der aromatischen Kohlenwasserstoffe im engeren Sinne, d. h. der 6 gliederigen einfachen und kondensierten isocyklischen Systeme geben und daran eine Zusammenstellung der alkylierten Pyridine und Chinoline schließen. Die anderen hierhergehörigen Kohlenwasserstoffe und ihre Derivate sind, soweit sie überhaupt einige Bedeutung haben, in den Spezialkapiteln beschrieben. Ein weiterer Abschnitt bringt eine ausführliche Beschreibung der aromatischen Kohlenwasserstoffe mit ungesättigten Seitenketten und ihrer Derivate.

Die Kohlenwasserstoffe der „Toluolgruppe" sind dadurch ausgezeichnet, daß sie — entsprechend ihrer Zusammensetzung aus einem Aryl und einem Alphyl — neben dem stark in den Vordergrund tretenden „aromatischen Charakter" (s. den Artikel „Aromatische Reihe") auch gewisse Eigentümlichkeiten der Fettreihe aufweisen, so z. B. leichte Oxydierbarkeit in der aliphatischen Seitenkette.

Die „Radikale" („Reste") vom Typus $C_6H_5CH_2$- werden „Aralkyle" genannt. Dementsprechend kann man die in diese Körperklasse gehörenden gesättigten und ungesättigten Kohlenwasserstoffe als Aralkane, Aralkene und Aralkine bezeichnen.

Die Kohlenwasserstoffe der Toluolgruppe finden sich zum Teil im Steinkohlenteer; einzelne der heterocyklischen Stoffe sind auch im Knochenöl enthalten.

Synthetisch entstehen sie u. a. nach den Gleichungen

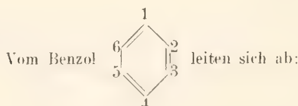


$$C_6H_5Br + CH_3J + 2Na = C_6H_5 . CH_3 + NaBr + NaJ$$
$$C_6H_4Br . CH_3 + C_2H_5J + 2Na = C_6H_4(C_2H_5)(CH_3) + NaBr + NaJ \quad \text{(Würtz-Fittig)}$$

$$C_6H_6 + CH_3Cl \xrightarrow{AlCl_3} C_6H_5 . CH_3 + HCl$$
$$C_6H_6 + 2CH_3Cl \xrightarrow{AlCl_3} C_6H_4(CH_3)_2 + 2HCl \quad \text{(Friedel-Crafts)}$$

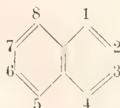
$$C_6H_5COOH \xrightarrow[\text{mit Natronkalk}]{\text{Trockene Destillation}} C_6H_6 + CO_2$$

2. Aromatische Verbindungen mit gesättigten Seitenketten.

Vom Benzol  leiten sich ab:

	Fp.	Sdp.
Methylbenzol $C_6H_5.CH_3$		110,3° (Toluol)
1,2-Dimethylbenzol $C_6H_4(CH_3)_2$	— 28°	142° (o-Xylol)
1,3-Dimethylbenzol	— 54°	139° (m-Xylol, Isoxylol)
1,4-Dimethylbenzol	+ 15°	138° (p-Xylol)
Aethylbenzol $C_6H_5.C_2H_5$		136°
1,2,3-Trimethylbenzol $C_6H_3(CH_3)_3$		175° (Hemimellithol)
1,2,4-Trimethylbenzol		170° (Pseudocumol)
1,3,5-Trimethylbenzol		164,5° (Mesitylen)
1,2-(o-)Methyläthylbenzol $C_6H_4(CH_3)(C_2H_5)$		159°
1,3-(m-)Methyläthylbenzol		159°
1,4-(p-)Methylaethylbenzol		162°
n-Propylbenzol $C_6H_5.CH_2CH_2CH_3$		158,5°
Isopropylbenzol $C_6H_5CH(CH_3)_2$		153° (Cumol)
1,2,3,4-Tetramethylbenzol $C_6H_2(CH_3)_4$	— 4°	204° (Prehnitol)
1,2,3,5-Tetramethylbenzol		196° (Isodurol)
1,2,4,5-Tetramethylbenzol	79°	190° (Durol)
1,2-(o-)Methylisopropylbenzol $C_6H_4(CH_3)[CH(CH_3)_2]$		175°
1,3-(m-)Methylisopropylbenzol		175°
1,4-(p-)Methylisopropylbenzol		175° (Cymol)
Pentamethylbenzol $C_6H(CH_3)_5$	53°	230°
Hexamethylbenzol $C_6(CH_3)_6$	164°	264°
Pentaäthylbenzol $C_6H(C_2H_5)_5$		277°
Hexaäthylbenzol $C_6(C_2H_5)_6$	129°	298°

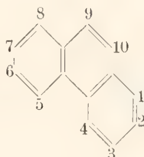
Vom Naphtalin



leiten sich ab:

	Fp.	Sdp.
1-(α-)Methylnaphtalin $C_{10}H_7.CH_3$	— 20°	240 bis 243°
2-(β-)Methylnaphtalin	+32,5°	241 bis 242°
1,4-Dimethylnaphtalin $C_{10}H_6(CH_3)_2$		262 bis 264°
1-(α)Aethylnaphtalin $C_{10}H_7.C_2H_5$		258°
2-(β-)Aethylnaphtalin	— 19°	251°
1-(α-)n-Propylnaphtalin $C_{10}H_7.(CH_2)_2CH_3$		274°
2-(β-)n-Propylnaphtalin		278°
1-(α-)n-Butylnaphtalin $C_{10}H_7.(CH_2)_3CH_3$		282°
2-(β-)n-Butylnaphtalin		284°
1-(α-)Isobutylnaphtalin $C_{10}H_7.CH_2CH(CH_3)_2$		137° (11 mm)
2-(β-)Isobutylnaphtalin		112° (6 mm)

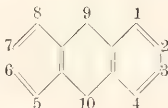
Vom Phenanthren



leiten sich ab:

	Fp.
1-Methylphenantren $C_{14}H_9.CH_3$	123°
3-Methylphenanthren	65°
9,10-Dimethylphenanthren $C_{14}H_8(CH_3)_2$	139°

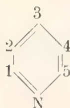
Vom Anthracen



leiten sich ab:

	Fp.
1-(α-)Methylanthracen $C_6H_4(CH)_2C_6H_3.CH_3$	86°
2-(β-)Methylanthracen	207°
1,6-Dimethylanthracen $C_6H_3(CH_3).(CH)_2.C_6H_3(CH_3)$	240°
2,6-Dimethylanthracen	244°
9,10-(γ-)Dimethylanthracen $C_6H_4(C.CH_3)_2C_6H_4$	179°

Vom Pyridin

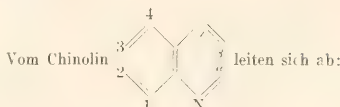


leiten sich ab:

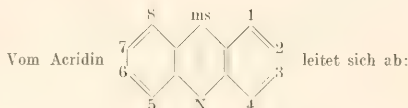
	Sdp.
1-(α-)Methylpyridin $C_5H_4(CH_3)N$	130° (α-Picolin[1])
2-(β-)Methylpyridin	143° (β-Picolin)
3-(γ-)Methylpyridin	144° (γ-Picolin)
1,3-Dimethylpyridin $C_5H_3(CH_3)_2N$	157° (αγ-Lutidin)
1,4-Dimethylpyridin	160° (αβ₁-Lutidin)
1,5-Dimethylpyridin	142° (αα₁-Lutidin)
2,3-Dimethylpyridin	164° (βγ-Lutidin)
2,4-Dimethylpyridin	170° (ββ₁-Lutidin)

[1]) pix = Pech, Teer.

	Fp.	Sdp.
1-(α-)Aethylpyridin $C_5H_4(C_2H_5)N$		148°
β-Aethylpyridin		166°
γ-Aethylpyridin		165°
1,3,5-Trimethylpyridin $C_5H_2(CH_3)_3N$		172° (1,3,5-Collidin)
1,3,4-Trimethylpyridin		165 bis 168° (1,3,4-Collidin)
1,2,3-Trimethylpyridin		185 bis 188° (1,2,3-Collidin)
1,4-Methyläthylpiridin $C_5H_3(CH_3)(C_2H_5)N$		178°
1,5-Methyläthylpyridin		160°
2,3-Methyläthylpyridin		190 bis 200° (β-Collidin)
α-Propylpyridin $C_5H_4(C_3H_7)N$		167° (Conyrin)
1,2,3,4-Tetramethylpyridin $C_5H(CH_3)_4N$		227 bis 230° (Parvolin)



	Fp.	Sdp.
α-Methylchinolin $C_9H_6(CH_3)N$		247° (Chinaldin)
β-Methylchinolin		253°
γ-Methylchinolin		257° (Lepidin)
αβ-Dimethylchinolin $C_9H_5(CH_3)_2N$		261°
αγ-Dimethylchinolin		266°
βγ-Dimethylchinolin	65°	290°
α-Aethylchinolin $C_9H_6(C_2H_5)N$		255 bis 260°
β-Aethylchinolin		265°
γ-Aethylchinolin		270 bis 275°



	Fp.
ms-Methylacridin $C_{13}H_8(CH_3)N$	114°

Literatur. ***V. von Richter,*** *Organische Chemie. Bd. II. Bonn 1913.*

K. Schaum.

3. Aromatische Kohlenwasserstoffe mit ungesättigten Seitenketten. Durch Einführung von Aryl in Olefine oder Acetylene entstehen aromatische Kohlenwasserstoffe mit ungesättigten Seitenketten. Je nach der gegenseitigen Position von Aryl und ungesättigter Bindung spricht man von Δ^1, Δ^2... Derivaten. Die Stellung zweier ungesättigter Bindungen wird durch Symbole wie $\Delta^{1,2}$, $\Delta^{1,3}$... ausgedrückt. Analog ist die Bezifferung bei noch mehr ungesättigten Bindungen.

3a) Aromatische Olefine. Styrolgruppe. Das einfachste der aromatischen Olefine ist das Phenyläthen oder Styrol, $C_6H_5CH = CH_2$. Da es gleichzeitig eines der am längsten bekannten aromatischen Olefine ist, heißt die Gesamtheit der zugehörigen Verbindungen Styrolgruppe. Die Unterteilung richtet sich nach Zahl und Position der vorhandenen Doppelbindungen. Demgemäß unterscheidet man

Styrole, mit einer Doppelbindung,
Styrolene, mit zwei Doppelbindungen,
Styrodiëne, mit drei Doppelbindungen usw.

Die Zahl der dargestellten Styrolkohlenwasserstoffe ist eine ziemlich große. Unter Einrechnung der Kernhomologen und Naphthylderivate mögen jetzt etwa 140 bekannt sein.

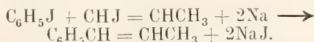
Gewinnung. Zur Darstellung der Styrole haben im wesentlichen folgende Reaktionen gedient:

1. Abspaltung von Halogenwasserstoff aus halogenierten Benzolen:



$$C_6H_5CH_2CHXR \xrightarrow{HX} C_6H_5CH = CHR.$$

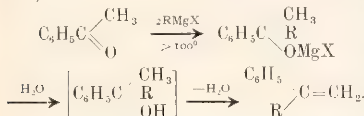
2. Synthese aus kernhalogenierten Benzolen und ungesättigten Alkylhaloiden mittels Natriums:



$$C_6H_5J + CHJ = CHCH_3 + 2Na \longrightarrow C_6H_5CH = CHCH_3 + 2NaJ.$$

3. Abspaltung von CO_2 aus Zimtsäuren, von HX und CO_2 aus Säuren $C_6H_5.CH_2CHX.COOH$ bezw. $C_6H_5.CHXCH_2COOH$ und von H_2O und CO_2 aus Säuren $C_6H_5CH(OH).CH_2COOH$ bezw. $C_6H_5CH_2CH(OH)COOH$.

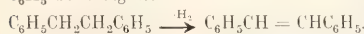
4. Umsetzung von Aldehyden, Ketonen und Säureestern mit Magnesiumalkylhaloiden, z. B.



Als Zwischenprodukte entstehen Karbinole, die oft direkt unter H_2O-Abspaltung das Styrol liefern. Im anderen Fall verwandelt man sie durch HCl in das betreffende Chlorid, dem dann durch Erhitzen mit Pyridin HCl entzogen wird. Andere Basen wie Anilin und Chinolin sind wegen polymerisierender Nebenwirkung weniger geeignet. Bisweilen kommt man auch durch Erhitzen des Karbinols mit Essigsäureanhydrid zum Ziel. Bemerkt sei, daß die Doppelbindung sich zum Aryl einstellt; ein Karbinol $C_6H_5CH_2CH(OH)CH_2R$ liefert also lediglich das Styrol $C_6H_5CH = CHCH_2R$, nicht aber $C_6H_5CH_2CH = CHR$.

Wegen der großen Auswahl unter den Reaktionskomponenten übertrifft die skizzierte Methode alle früheren Verfahren. Bei weitem die meisten der komplizierteren Styrole sind erst mit ihrer Hilfe zugänglich geworden.

5. Aus Kohlenwasserstoffen $C_6H_5CH_2CH_2.C_6H_5$ bei Rotglut:



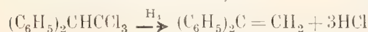
$$C_6H_5CH_2CH_2C_6H_5 \xrightarrow{H_2} C_6H_5CH = CHC_6H_5.$$

6. Destillation von Zimtsäurearylestern; z. B.



$$C_6H_5CH = CHCOOC_6H_5 \longrightarrow C_6H_5CH = CHC_6H_5 + CO_2.$$

7. Zersetzung von Diaryltrichloräthanen (aus Benzolen und Chloral durch Schütteln mit konzentrierter H_2SO_4 erhältlich) durch Zinkstaub und Ammoniak, z. B.



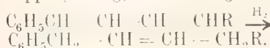
$$(C_6H_5)_2CHCCl_3 \xrightarrow{H_2} (C_6H_5)_2C = CH_2 + 3HCl$$

Auf andere, spezielle Bildungsweisen ist weiter unten gelegentlich verwiesen.

Allgemeine Eigenschaften der Styrole. Die meisten Styrole sind Flüssigkeiten von starkem Lichtbrechungsvermögen. Im Vakuum sieden fast alle unzersetzt; bei gewöhnlichem Druck neigen indes manche schon vor oder bei ihrer Siedetemperatur mehr oder minder stark zur Polymerisation. Außer durch Wärme wird die Polymerisation auch durch andere Faktoren begünstigt. So durch Licht, ferner durch Stoffe wie konzentrierte H_2SO_4, Anilin oder Chinolin. Die Molekularrefraktion weist für $\triangle^1$-Styrole Exaltationen auf, die bei den $\triangle^{1,3}$-Styrolen, deren Doppelbindungen konjugiert sind, ganz erhebliche Werte annehmen. Man hat deshalb in der Bestimmung der Molekularrefraktion ein Mittel zur Feststellung der Lage der Doppelbindungen in Styrolen und deren Derivaten. Einige Styrole sind auch in optisch-aktiven Formen dargestellt. Diese zeichnen sich durch geringe Neigung zur Racemisation aus. Ferner weisen sie ein erheblich größeres Drehungsvermögen auf als die entsprechenden gesättigten Benzole.

In chemischer Hinsicht zeigen die Styrole eine Kombination von Eigenschaften aromatischer und ungesättigter Stoffe. Der aromatische Charakter macht sich z. B. gegenüber starker HNO_3 geltend, die wesentlich nitrierend wirkt. Ferner gegenüber Oxydationsmitteln. Gelinder wirkende Mittel sprengen an der Stelle der Doppelbindung. Dabei entstehen Aldehyde oder Ketone. Bei energischer Oxydation kann die ungesättigte Seitenkette indes zu -COOH verbrennen.

Als ungesättigte Verbindungen addieren die Styrole leicht Wasserstoff. Hierbei gehen sie in die entsprechenden gesättigten Benzole über, deren kompliziertere Vertreter meist erst auf diese Weise zugänglich geworden sind. Der Verlauf der Reduktion ist aber nicht immer glatt. So wirken zunächst verschiedene Reduktionmittels nicht in analoger Weise. Ferner ist ein Einfluß der Stellung der Doppelbindung unverkennbar. Für die Reduktion mittels Na und $C_2H_5(OH)$ haben sich dabei bemerkenswerte Regelmäßigkeiten ergeben. So sind Doppelbindungen in $\triangle^1$ leicht reduzierbar, während solche in $\triangle^2$ widerstehen. Nicht reduzierbar ist aber die Doppelbindung selbst in $\triangle^1$, wenn der Atomkomplex $= C(CH_3)_2$ vorliegt, wie z. B. in $C_6H_5CH = C(CH_3)_2$. Im Gegensatz dazu ist Triphenyläthen, $C_6H_5CH = C(C_6H_5)_2$, glatt reduzierbar, ein Zeichen für den spezifischen Einfluß benachbarter Aryle. Von zwei Aethylenbindungen wird nur die in $\triangle^1$ reduziert. Sind sie aber einander konjugiert ($\triangle^{1,3}$), dann findet Addition des H_2 in 1,4 Stellung statt. Gleichzeitig bildet sich in $\triangle^2$ eine neue Doppelbindung, die nicht angreifbar ist:



$$C_6H_5CH = CH - CH = CHR \xrightarrow{H_2} C_6H_5CH_2 - CH = CH - CH_2R.$$

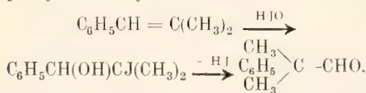
Die Addition von Halogen (Cl oder Br) oder Halogenwasserstoff verläuft in manchen Fällen glatt, in anderen wird aber nicht so viel addiert, als der Zahl der Doppelbin-

dungen entsprechen würde oder es entstehen nur wenig beständige Produkte. So verlieren z. B. viele Bromanlagerungsverbindungen spontan oder beim gelinden Erwärmen HBr und gehen dabei in beständige Bromstyrole über. Hierbei resultieren oft Gemische stereoisomerer Formen.

Bemerkt sei, daß auch Stickoxyde additionell aufgenommen werden. Dabei liefern Styrole $C_6H_5CH = CHR$ schließlich Dioxime von 1,2 Diketonen.

Wichtig ist die Neigung der $\triangle^2$-Styrole zum Uebergang in $\triangle^1$-Styrole. Es erfolgt dies z. B. unter dem Einfluß von alkoholischem Kali oder Natriummethylat. Die resultierenden $\triangle^1$-Derivate haben höheres spezifisches Gewicht, höheren Schmelzpunkt und stärkere Lichtbrechung.

Eine weitere Umlagerungsreaktion zeigen die Styrole bei der Behandlung mit gelbem HgO und Jod, der eventuell noch Einwirkung von $AgNO_3$ nachfolgen muß. In erster Linie kommt es hierbei zur Bildung von Jodhydrinen. Diese verlieren dann HJ und gehen unter gleichzeitiger Wanderung von Aryl in Aldehyde oder Ketone über. So liefert z. B. Isobutenylbenzol Dimethylphenylacetaldehyd:



Die Reaktion ist nicht völlig geklärt. Festgestellt ist aber, daß Phenyl weniger beweglich ist als substituierte Phenyle, z. B. Tolyl, ja selbst als Naphthyl.

Die von der Theorie vorausgesehenen raumisomeren Styrole sind z. T. bekannt, z. B. existiert das Stilben in zwei derartigen Formen.

Derivate der Styrole. Die Styrole sind die Grundsubstanzen mancher wichtiger Verbindungen, die als Produkte von Pflanzen nachgewiesen worden sind. Vor allem sind die Sauerstoffderivate von Bedeutung. Bezüglich der in Betracht kommenden Stoffe sei auf die unten befindliche Zusammenstellung verwiesen.

$\triangle^1$-Styrole.

1. Styrol, Phenyläthen, Vinylbenzol, $C_6H_5CH = CH_2$. Stark lichtbrechende aromatisch riechende Flüssigkeit Sdp. 144°. Unlöslich in Wasser, löslich in Alkohol und Aether. Findet sich im Storax. Beim Aufbewahren findet allmähliche Polymerisation zu sogenanntem Metastyrol, $(C_8H_8)_x$, statt. Licht oder Wärme (200°) beschleunigen den Vorgang ganz erheblich. Im Gegensatz zum ungesättigten Styrol, das leicht zwei Atome Brom addiert, ist das Metastyrol ein gesättigtes Produkt. Außerdem hat es die Beschaffenheit eines Kolloids. Bei der trockenen Destillation regeneriert es quantitativ Styrol. Erhitzt man Styrol längere Zeit mit konzentrierter HCl auf 170°, so entsteht das flüssige Distyrol $(C_8H_8)_2$, vom Sdp. 312°. Ursprünglich sah man das Produkt als niederes Polymeres des Styrols an. Neuerdings konnte indes wahrscheinlich gemacht werden, daß in ihm ein $\triangle^1$-Styrol, nämlich, α,γ-Diphenyl-α-buten, $C_6H_5CH = CH - C(C_6H_5)CH_3$, vorliegt. Das in der Literatur erwähnte sogenannte feste Distyrol hat sich kürzlich mit Stilben (s. d.) identifizieren lassen.

Styrolbromid, $C_6H_5CHBrCH_2Br$, Fp. 74 bis 75,5°, Sdp. 139 bis 141° (15 mm), Blättchen oder Nadeln.

Von Homologen sind eine ganze Anzahl bekannt, die Alkyl entweder im Kern oder in der Seitenkette enthalten. Zu unterscheiden sind 3 Typen

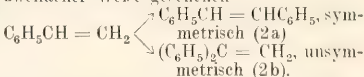
a) $RC_6H_4.CH = CH_2$, z. B. m-Methylstyrol, $C_6H_4(CH_3)CH = CH_2$, Sdp. 164°.

b) $C_6H_5CR = CH_2$, z. B. β-Phenylpropen, C_6H_5, CH_3 >$C = CH_2$, Sdp. 158 bis 160°.

c) $C_6H_5CH = CHR$, z. B. Propenylbenzol, $C_6H_5CH = CHCH_3$, Sdp. 174 bis 175°.

R ist sehr variationsfähig; seine Einführbarkeit in den einen oder anderen Typ ist bis $-C_{14}H_{29}$ festgestellt.

Einführung eines zweiten Aryls kann in zweifacher Weise geschehen



Derivate beider Grundformen sind in größerer Zahl bekannt. Es genügt kurze Beschreibung der beiden Typen selbst: 2a) Symm. Diphenyläthen, Stilben, $C_6H_5CH=CHC_6H_5$, entsteht auf sehr mannigfaltige Weise. Es bildet große, monokline Tafeln vom Fp. 124° und ist leicht löslich in Aether und Benzol. Sehr beständig gegen Hitze, zersetzt sich erst bei Hellrotglut. Ein öliges Isostilben wird durch Reduktion von Diphenylacetylen (Tolan) mit Zinkstaub und Alkohol erhalten (Sdp. 142 bis 143° bei 21 mm). Bei Belichtung regeneriert es das gewöhnliche Stilben. Die Aethylenwasserstoffatome des Stilbens sind durch Cl oder Br ersetzbar. Die Monohalogenstilbene sind wegen ihres Auftretens in je zwei stereoisomeren Formen von Bedeutung:

Chlorstilben, $C_6H_5CCl = CHC_6H_5$, α) flüssig β) Fp. 54°.
Bromstilben, $C_6H_5CBr = CHC_6H_5$ α) flüssig β) Fp. 31°.

Auch Di-o-Nitrostilben und Di-p-Nitrostilben sind in den beiden stereoisomeren Formen erhältlich:

o-Verbindung: trans-Der. Fp. 191—192°, cis-Der. Fp. 126°.
p-Verbindung: Fp. 280—285° bzw. Fp. 210—216°.

2b) α-α-Diphenyläthen, $(C_6H_5)_2C = CH_2$, Nadeln, Fp. 8 bis 9°, Sdp. 152° (14 mm). Liefert mit Cl und Br Additionsprodukte, die leicht in HCl bezw. HBr und substituiertes Diphenyläthylen zerfallen. Bei der Oxydation entstehen Formaldehyd (schon beim Liegen an der Luft durch den Geruch nachweisbar) sowie Benzophenon.

Von Tri- und Tetra-Arylstilbenen seien genannt:
3a) α, α, β-Triphenyläthen, $(C_6H_5)_2C = CHC_6H_5$, Fp. 67—68° (62°), Sdp. 220—221° (14 mm).
3b) Tetraphenyläthen, $(C_6H_5)_2C = C(C_6H_5)_2$, Fp. 224°, Sdp. 415—425°. u. a. aus Benzophenonchlorid durch fein verteiltes Ag erhältlich.

Von Naphthylstilbenen sind zu erwähnen:
4a) (α-Naphthyl)äthen, $C_{10}H_7CH = CH_2$, Sdp. 135—138° (15 mm).
4b) α-(α-Naphthyl)propen, $C_{10}H_7CH = CHCH_3$, Sdp. 275—278°.
4c) β-(α-Naphthyl)propen, $C_{10}H_7C.CH_3 = CH_2$, Sdp. 125° (8 mm).
4d) α-Phenyl-β(-αNaphthyl)äthen, $C_{10}H_7CH = CHC_6H_5$, Fp. 205—207°.
4e) α-Phenyl-α(α-Naphthyl)äthen, $C_{10}H_7.C.C_6H_5 = CH_2$, Fp. 60°, Sdp. 350—355°.

$\triangle^2$-Styrole.

1. Allylbenzol, γ-Phenyl-α-propen, $C_6H_5CH_2CH = CH_2$, Sdp. 155°, früher Isoallylbenzol genannt. Ist die Muttersubstanz wichtiger Naturprodukte.
2. Isobutenylbenzol, $C_6H_5CH_2 - CH = C(CH_3)_2$, Sdp. 205°.
3. α-Phenyl-β-penten, $C_6H_5CH_2 - CH = CHC_2H_5$, Sdp. 201°.
4. α-Phenyl-β-hexen, $C_6H_5CH_2 - CH = CHC_3H_7(n)$, Sdp. 108° (16 mm).
5. Tetrabenzyläthen, $(C_6H_5CH_2)_2C = C(CH_2C_6H_5)_2$, Sdp. 304°.
6. γ-(α-Naphthyl)-α-propen, $C_{10}H_7CH_2CH = CH_2$, Sdp. 265—267°.

$\triangle^{1,2}$-Styrolene.

1. Trimethyl-phenyl-allen, $C_6H_5C.CH_3 = C = C(CH_3)_2$, Sdp. 107—108° (20 mm), aus Mesityloxyd und Phenylmagnesiumbromid. Gibt bei der Oxydation Acetophenon. Bildet ein öliges Tetrabromid.
2. Tetraphenylallen, $(C_6H_5)_2C = C = C(C_6H_5)_2$, Fp. 164°, u. a. aus Benzalacetophenon und Phenylmagnesiumbromid.

$\triangle^{1,3}$-Styrolene.

1. α-Phenyl-α, γ-butadiën, $C_6H_5CH = CH - CH = CH_2$, Fp. 4,5°, Sdp. 94—96° (18 mm), bildet ein Polymeres, Sdp. 221° (17 mm).
2. α-Phenyl-α, γ-pentadiën, $C_6H_5CH = CH - CH = CHCH_3$, Sdp. 245—255°, bezw. 116° (16 mm).
3. α-Phenyl-α, γ-hexadiën, $C_6H_5CH = CH - CH = CHC_2H_5$, Sdp. 128° (16 mm).
4. α-Phenyl-ζ-Methyl-α, γ-heptadiën, $C_6H_5CH = CH - CH = CH - CH_2 - CH(CH_3)_2$, Sdp. 146 bis 147° (15 mm).
5. α-δ Diphenyl-α, γ-butadiën, $C_6H_5CH = CH - CH = CHC_6H_5$, ist in drei stereoisomeren Formen bekannt: cis-cis, Fp. 70—70,5°; cis-trans, flüssig; trans-trans, Fp. 147—148°.

Styrodiëne.

Die Styrodiëne sind in zwei Reihen zu scheiden. Die erste umfaßt die Derivate mit
a) 3 fortlaufenden Doppelbindungen, z. B.
α, ζ-Diphenyl-α, γ, ε-Hexatriën, $C_6H_5CH = CH - CH = CH - CH = CHC_6H_5$, Fp. 194°, aus Phenylisocrotonsäure und Zimtaldehyd (+ Essigsäureanh.).

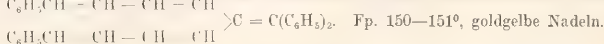
Der anderen Reihe gehören die Styrodiëne mit
b) 3 gekreuzten Doppelbindungen an, z. B.
α,ε-Diphenyl-γ-Diphenylmethylen-α,δ-pentadiën, $\begin{matrix} C_6H_5CH = CH \\ C_6H_5CH = CH \end{matrix}\!\!>\!C = C(C_6H_5)_2$, Fp. 173—174°, aus Dibenzalaceton und Diphenylketen. Diese Klasse von Styrodiënen ist durch Farbigkeit ausgezeichnet. Sie gleicht darin den ebenfalls (und zwar noch stärker) farbigen Fulvenen, zu denen auch konstitutionell Analogie besteht. Ursache der Farbigkeit ist in erster Linie die eigenartige Anordnung der 3 Doppelbindungen.

Styrotriëne.

Von den Styrotriënen ist nur ein Vertreter bekannt, das α, ϑ-Diphenyl-α,γ,ε,η-Oktatetraën, $C_6H_5CH = CH - CH = CH - CH = CH - CH = CHC_6H_5$, welches durch Kondensation von Zimtaldehyd mit Bernsteinsäureester (+ Na-Aethylat) in einer weißen, bei 124° schmelzenden Form erhalten wird, während es aus Zimtaldehyd und bernsteinsaurem Natrium (+ Essigsäureanh.) in goldgelben, bei 225° schmelzenden Kristallen resultiert. Die Isomerie ist auf räumliche Ursachen zurückzuführen. Belichtung unter Sauerstoffausschluß wandelt das gelbe in das weiße Produkt um. Am Licht neigen beide Modifikationen sehr zur Oxydation. Beide zeigen starke Fluoreszenz, die weiße blau, die gelbe grün.

Styrotetraëne.

Auch von den Styrotetraënen ist nur ein Vertreter bekannt. Es ist dies das aus Di-cinnamalaceton und Diphenylketen entstehende α, ϑ-Diphenyl-ε-Diphenylmethylen-α, γ, ζ, -ϑ-oktatetraën



$$\begin{matrix} C_6H_5CH = CH - CH = CH \\ C_6H_5CH = CH - CH = CH \end{matrix} \!\!> C = C(C_6H_5)_2.$$ Fp. 150—151°, goldgelbe Nadeln.

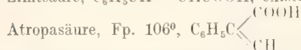
Verzeichnis wichtiger Derivate der Styrolkohlenwasserstoffe.
(vgl. dazu die Artikel „Alkohole“, „Säuren“ usw.)

a) Olefinphenole:
- Chavikol, Sdp. 237°, $C_6H_4(OH)$-4-$CH_2CH = CH_2$, im Betelöl,
- Esdragol, Sdp. 215°, $C_6H_4(OH)$-4-$CH_2CH = CH_2$, im Esdragonöl,
- Anethol, Fp. 21°, Sdp. 232°, $C_6H_4(OH)$-4-$CH = CHCH_3$, im Anisöl usw.,
- Eugenol, Sdp. 252°, $\left.\begin{matrix} HO\ 4 \\ CH_3O\ 3 \end{matrix}\right\} C_6H_3CH_2CH = CH_2$, im Nelkenöl,
- Isoeugenol, Sdp. 260°, $\left.\begin{matrix} HO\ 4 \\ CH_3O\ 3 \end{matrix}\right\} C_6H_3CH = CHCH_3$,
- Chavibetol, Sdp. 254°, $\left.\begin{matrix} HO\ 3 \\ CH_3O\ 4 \end{matrix}\right\} C_6H_3CH_2CH = CH_2$, im Oel von Piper Betle,
- Eugenolmethyläther, Sdp. 244°, $(CH_3O)_2$-3, 4-$C_6H_3.CH_2CH = CH_2$, im Bayeöl usw.,
- Safrol, Skikimol, Fp. 11°, Sdp. 232°, (CH_2O_2)-3, 4-$C_6H_3CH_2CH = CH_2$, im Sassafrasöl usw., gibt bei der Oxydation Piperonal.
- Isosafrol, 2 Formen vom Sdp. 242° oder 252°, (CH_2O_2)-3, 4-$C_6H_3CH = CHCH_3$,
- Asaron, Fp. 67°, Sdp. 296°, $(CH_3O)_3$-2, 4, 5-$C_6H_2CH_2CH = CHCH_3$, im Oel von Asarum europaeum,
- Apiol, Fp. 30°, Sdp. 294°, $\left.\begin{matrix} (CH_3O)_2 \\ (CH_2O_2) \end{matrix}\right\} C_6HCH_2CH = CH_2$, im Petersiliensamen.

b) Phenylolefinalkohole:
- Zimtalkohol, Fp. 33°, Sdp. 250°, $C_6H_5CH = CHCH_2(OH)$, als Zimtsäureester im Storax.
- Coniferylalkohol, Fp. 73°, $\left.\begin{matrix} HO\ 4 \\ CH_3O\ 3 \end{matrix}\right\} C_6H_3CH = CHCH_2(OH)$, aus Coniferin mittels Emulsins.

c) Phenylolefinaldehyde:
- Zimtaldehyd, Sdp. 247°, $C_6H_5CH = CHCHO$, im Zimtöl und Cassiaöl.

d) Phenylolefinkarbonsäuren:
- Zimtsäure, $C_6H_5CH = CHCOOH$, existiert in 4 Formen.



- Atropasäure, Fp. 106°, $C_6H_5C\!\!\begin{matrix} \diagup COOH \\ \diagdown\!\diagdown CH_2 \end{matrix}$.

e) Oxyphenylolefinkarbonsäuren:
- o-Cumarsäure, o-Oxyzimtsäure, Fp. 208°, im Steinklee usw.
- Cumarin, o-Cumarsäureanhydrid, Fp. 67°, Sdp. 290°, im Waldmeister usw.
- Kaffeesäure, 3,4-Dioxyzimtsäure, Fp. 213°, im Harz der Schwarzföhre.
- Ferulasäure, m-Methoxy-p-Oxyzimtsäure, Fp. 169°, im Harz von Asa foetida.
- Umbelliferon, 4-Oxycumarin, Fp. 240°, im Seidelbast, bei der Destillation von Umbelliferenharzen.
- Daphnetin, 3,4-Dioxycumarin, Fp. 255°, aus Daphnin,
- Aesculetin, 4,5-Dioxycumarin, Fp. 270°, aus Aesculin,
- Piperinsäure, 3,4-Methylendioxy-cinnamenylacrylsäure, Fp. 217°, (CH_2O_2)-3,4-$C_6H_3CH = CH - CH = CH.COOH$, aus Piperin neben Piperidin.

3b) Aromatische Acetylene. Einteilung. Die Einteilung der aromatischen Acetylene ist eine sehr einfache, weil die Zahl der einzelnen Verbindungsklassen gering ist. Man unterscheidet:

a) einfache Acetylene, $C_6H_5C \equiv CH$,
b) Diacetylene, $C_6H_5C \equiv C - C \equiv CC_6H_5$, und
c) Acetylen-Olefine, $C_6H_5C \equiv C - CH = CH_2$.

Gewinnung: Die Gewinnung der Stoffklassen b und c gründet sich auf die Darstellung der einfachen Acetylene.

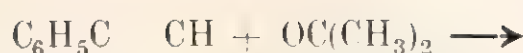
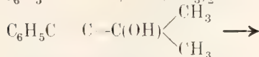
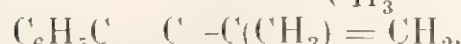
Hierzu sind wesentlich 2 Methoden verfügbar:

1. Zweifache HX-Abspaltung aus dihalogenierten Benzolen $C_6H_5CHX - CHXR$ bezw. $C_6H_5CH_2CX_2R$ oder $C_6H_5CX_2CH_2R$. Als Zwischenprodukte werden monohalogenierte Styrole erhalten, die natürlich ebenfalls als Ausgangsprodukte dienen können.

2. Abspaltung von CO_2 aus Phenylpropiolsäure, $C_6H_5C \equiv C.COOH$, welche auf verschiedene Weise leicht zugänglich ist. Die CO_2-Abspaltung geschieht am besten durch Behandlung des Cu-Salzes mit H_2O-Dämpfen.

Di-Acetylene werden durch Oxydation der Cu-Verbindungen einfacher Acetylene mit alkalischer $K_3Fe(CN)_6$-Lösung erhalten.

Acetylen-Olefine endlich resultieren bei Kondensation von Phenylacetylen mit Ketonen unter dem Einfluß festen Aetzkalis. z. B.

Die nach den skizzierten Methoden gewonnenen aromatischen Acetylene sind bei weitem nicht so zahlreich als die Styrole. Man kennt heute erst etwa 25 Vertreter, Kernhomologe und naphthylierte Acetylene eingerechnet.

Allgemeine Eigenschaften: Von den aromatischen Acetylenen bilden nur die mit der Gruppe $\equiv CH$ Metallverbindungen, also Phenylacetylen und seine Kernsubstituierten Derivate. Die Cu- und Ag-Verbindungen sind schwach explosiv. Viele aromatische Acetylene lassen sich unter vermindertem Druck unzersetzt destillieren. Manche sind sehr zur Verharzung geneigt; dies gilt insbesondere auch für die Acetylen-Olefine. Bei anderen bedarf es hierzu erst der Einwirkung von konzentrierter H_2SO_4. Bei der Reduktion kommt dem Reduktionsmittel große Bedeutung hinsichtlich des erzielten Effektes zu. Auch die Position der Acetylenbindung und ihre Konjugation mit einer zweiten oder einer Aethylenbindung ist ausschlaggebend. Im allgemeinen scheinen ähnliche Regeln zu gelten, wie sie hinsichtlich der Reduzierbarkeit von Styrolen mitgeteilt sind, nur daß hier noch die partielle Hydrierung der dreifachen Bindung kinzukommt. Die Addition von Brom oder Bromwasserstoff verläuft in manchen Fällen normal. In anderen wieder sind Hemmungen zu konstatieren, deren Ursachen nicht immer klar zutage liegen. Erwähnt sei, daß z. B. Diphenyldiacetylen unter Bedingungen, welche quantitative Anlagerung von HBr an Diphenylbutenin veranlassen, unverändert bleibt. Bei der unvollkommenen Bromaddition kommt es oft zur Bildung von verschiedenen Aethylenisomeren. Desgleichen bei der partiellen Reduktion, so z. B. bei Diphenyldiacetylen und Tolan. — Von Interesse ist, daß der absorptiometrische Wert der Acetylenbindung zwar größer als der einer einfachen aber kleiner als der einer doppelten Bindung ist. Aehnliches gilt für die Beeinflussung der Fluoreszenz und Radiolumineszenz.

Einfache Acetylene.

1. Phenylacetylen, $C_6H_5C \equiv CH$, fl. Sdp. 142°, addiert direkt 4 Atome Br. Cu-Verbindung hellgelb, flockig; Ag-Verbindung weiß, gallertartig; Phenylacetylen gibt bei der Reduktion mit Zink und Eisessig Styrol, bei der Behandlung mit verdünnter H_2SO_4 Acetophenon.
2. p-Tolylacetylen, $C_6H_4(CH_3)C \equiv CH$, Fp. 23°, Sdp. 60—70° (35—40 mm); 168° (760 mm).
3. Phenylallen, $C_6H_5C \equiv CCH_3$, Sdp. 185°, auch aus Phenylacetylen und Jodmethyl bei Gegenwart von Alkali erhältlich, gibt keine Metallder.
4. Phenylbutin, $C_6H_5C \equiv CC_2H_5$, Sdp. 201°, auch aus Phenylacetylen und Jodäthyl darstellbar.
5. α-Naphthylacetylen, $(1)C_{10}H_7C \equiv CH$, fl., Sdp. 143—144° (25 mm), gibt Metallder.
6. β-Naphthylacetylen, $(2)C_{10}H_7C \equiv CH$, Fp. 36°, gibt Metallder.
7. Diphenylacetylen, Tolan, $C_6H_5C \equiv CC_6H_5$, Fp. 60°, addiert 2 und 4 Atome Br.
8. Di-(α-Naphthyl)acetylen, $(1)C_{10}H_7C \equiv CC_{10}H_7(1)$, seidengl. Nädelchen, Fp. 225°.

Di-Acetylene.

1. Diphenyldiacetylen, $C_6H_5C \equiv C — C \equiv CC_6H_5$, Nadeln, Fp. 88°. Addiert bis 8 Atome Br. Bei Anlagerung von 4 Atomen Br. entstehen stereoisomere Tetrabromide. Bei der Reduktion werden je nach Wahl des Reduktionsmittels verschiedene Produkte erhalten.
   Das o-Nitroderivat läßt sich in Indigo überführen.
2. Di-(α-Naphthyl)diacetylen, $C_{10}H_7C \equiv C — C \equiv C.C_{10}H_7$, Fp. 171°.

Acetylen-Olefine.

1. δ-Phenyl-β-Methyl-α, γ-Butenin, $C_6H_5C \equiv C — C(CH_3) = CH_2$, Sdp. 88° (7 mm).
2. α, δ-Diphenyl-α, γ-Butenin, $C_6H_5C \equiv C — CH = CHC_6H_5$, existiert in 2 isomeren Formen: cis-Der., Sdp. 188—195° (12 mm), liefert bei Belichtung das trans-Der. Fp. 96,5—97°.

Es sind auch Derivate des Pyridins usw. mit ungesättigten Seitenketten bekannt; sie haben jedoch keine sonderliche Bedeutung und können hier übergangen werden.

Literatur. ***Beilstein***, *Handbuch der organischen Chemie. Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft, 1902 u. fg. Chemisches Centralbl., 1902 u. fg.*

Joh. Scheiber.

Ton.

Ein mehr oder weniger reines wasserhaltiges Aluminiumsilikat, das hauptsächlich durch die Verwitterung der Feldspäte entsteht. Vgl. die Artikel „Mineralien. Gesteinsbildende Mineralien“, „Petrochemie der Sedimente“, „Porzellan“.

Tonsysteme.

Einleitung. I. Tonhöhenordnung. A. Das reine Tonsystem. 1. Grundintervalle. 2. Quintgeneration. 3. Terzverwandte Quintgeneration, Kommabegriff. 4. Buchstabentonschrift. B. Das temperierte Tonsystem. 1. Der Quintenzirkel. 2. Logarithmische Schwingungszahlmaße. 3. Logarithmische Buchstabentonschrift. 4. Logarithmischer Quintenzirkel. 5. Temperierte Tastatur. 6. Reine und temperierte Intervalle nach logarithmischem Maße. 7. Logarithmisches Halbtonstufenmaß. 8. 53stufiges temperiertes Tonsystem reiner Stimmung. 9. Das 53stufige Instrument. II. Musikalische Tonsysteme. 1. Konsonanzbegriff, Tonizität und Phonizität. 2. Konsonanz der Intervalle. 3. Amphibolie der Intervalle. 4. Klangvertretung. 5. Konsonanz der Dreiklänge. 6. Akkordfolge. 7. Musikalische Tonsysteme, Tongeschlechter, Tonarten. 8. Reine Tonarten. 8. Gemischte Tonarten. 9. Dissonanz und Auflösung. 10. Modulation. 11. Metharmose und Enharmose. 12. Melodie. 13. Monismus und Dualismus. 13. Akustische und musikalische Konsonanz. 14. Kunstanalyse.

Einleitung. Zwischen dem tiefsten noch hörbaren Tone und dem höchsten wird eine Menge von Tönen ausgewählt, deren Schwingungszahlen in bestimmter Beziehung zueinander stehen. Ein willkürlich wählbarer Anfangston gilt als Ausgang; nach dessen Tonhöhe werden alle übrigen festgesetzt. Je zwei Töne bilden ein Intervall. Obwohl Intervall Zwischenraum heißt, so wird das Wort anders gebraucht; es bezeichnet die beiden Töne selbst, zuweilen auch das ganze Tongebiet in deren Grenzen. Man empfindet gleiche Intervalle bei gleichem Verhältnis der Schwingungszahlen. Zwei Töne m und n bilden dasselbe Intervall wie a.m und a.n. — Man unterscheidet reine und temperierte Intervalle; bei jenen stehen die Schwingungszahlen in ganzzahligem Verhältnis, bei diesen finden ganz bestimmte Abweichungen vom reinen Verhältnis statt. Dem entsprechen auch rein und temperiert gestimmte Instrumente. Zwecks musikalischer Verwendung werden kleinere Gruppen von Tönen zu Tonsystemen zusammengestellt, zu Tongeschlechtern oder Tonarten.

I. Tonhöhenordnung.

A. Das reine Tonsystem.

1. Grundintervalle. Drei Intervalle werden der Tonhöhenordnung zugrunde gelegt:

Die Oktave, Schwingungs-Verhältnis 1:2
Die Quinte, Schwingungs-Verhältnis 2:3
Die große Terz, Schwingungs-Verhältnis 4:5

Einen Anfangston nennen wir d; er soll 288 Schwingungen in der Sekunde machen. Von ihm aus können Oktavschritte in die Höhe, sowie auch in die Tiefe ausgeführt werden; wir unterscheiden die gefundenen Töne voneinander durch angehängte Zahlen:

d^{I}	d^{II}	d^{III}	d^{IV}	d^{V}	d^{VI}	d^{VII}	d^{VIII}	d^{IX}	d^{X}
18	36	72	144	288	576	1152	2304	4608	9216

Schwingungen. Dadurch ist das ganze Tonhöhengebiet in Oktaven eingeteilt. Neue Töne erhalten wir, indem zu d^{V} die obere Quinte gebildet wird, die wir, dem Gebrauch gemäß, mit a^{V} bezeichnen, sowie die untere Quinte, die g^{IV} heißt. Zu a wie zu g denken wir uns deren Oktaven, die wieder durch ihre Ziffern sich unterscheiden. Dasselbe Verfahren führt weiter zu neuen Quinten, die nunmehr in jeder beliebigen Oktave die Töne f, c, g, d, a, e, h bilden. Durch Zurückführung in tiefere oder höhere Oktaven kann man immer erreichen, daß die neugewonnenen Töne innerhalb einer Oktave nebeneinander liegen, so daß wir von jetzt ab nicht mehr von Versetzung in andere Oktaven zu reden brauchen. Indes genügen die vorstehenden sieben Töne nicht, sondern es werden in derselben Weise, wie vorhin, sich immer neue Quinten bilden lassen: die Namen schließen sich aber den vorstehenden an: es wird die Quinte von h, weil sie zwischen f und g liegt, fis genannt, und entsprechend wird jeder neuen Quinte ein Name gegeben, der sich durch Anhängen der Silbe is findet. Aber auch nach unten, von f aus lassen sich immer neue Quinten bilden und man hängt den vorigen Namen die Silbe es an. So entsteht eine im Prinzip unendlich weit sich erstreckende Reihe von Tönen, deren Gesamtheit eine Quintgeneration heißt.

2. Quintgeneration. Man findet sie eingetragen in die folgende Tabelle in der mittelsten Zeile. Sie kann unendlich weit nach rechts und nach links fortgesetzt werden; indes kommt in Wissenschaft und Kunst immer nur ein kleiner Teil des Gebietes mit beliebigem Anfangspunkt zur Anwendung. Kein Ton dieser Quintgeneration kann einem anderen gleich sein, weil ein Produkt von lauter 3en niemals durch Division mit zwei aufgehen kann. Trotz der unendlich großen Zahl von Tönen müssen wir doch noch anders bestimmte einführen, die dem Ausgangstone näher verwandt sind, d. h. in naher Beziehung stehen.

3. Terzverwandte Quintgeneration, Kommabegriff. Bildet man von d aus vier Quinten, so hat man fis und es ist d: fis^{II} = 1:81 oder d:fis = 64:81. — Nun verlangen wir zu jedem Tone auch seine große Terz, also das Verhältnis 4:5, welches = 64:80 ist. Die große Terz, die den gleichen Namen erhält, muß von der vierten Quinte zu unterscheiden sein; sie steht ein syntonisches Komma tiefer, d. h. im Verhältnis von 80:81. Die Vertiefung der Stimmung um diesen Betrag, also um ein Komma, wird

angedeutet durch einen **Strich über dem** Tonnamen, also wird nun $\overline{\text{fis}}$:fis = 80:81 sein. Auch die untere große Terz wird gebildet und man erhält nun b:b = 81:80. Zu diesen beiden neuen Tonhöhen können nun wieder neue ganze Quintgenerationen gebildet werden, wie man sie im Schema Figur 1 über und unter der Mittelzeile verzeichnet findet. Der **Strich unter dem** Namen, wie bei b, hebt die Stimmung um ein Komma; deshalb nennen wir es ein **Hebekomma**, während jenes ein **Senkekomma** heißt.

4. **Buchstabentonschrift.** Es liegt nun nahe, nach demselben Verfahren immer weiter neue **terzverwandte Quintgenerationen** zu bilden. Die hier folgende Buchstabentonschrift hat fünf Quintgenerationen aufgenommen; nach allen vier Seiten kann aber die Tafel ohne Ende fortgesetzt werden. Dieser Tafel entnimmt man sofort das Schwingungsverhältnis zweier beliebiger Töne; dahin weisen die oben und seitlich hinzugefügten Exponenten. Es ist z. B. c:dis = $1:3.5.5.2^{X}$ oder fes:e = $2^{X}5^{2}.3^{4}$. Wird d = 1 gesetzt, so sind alle anderen Schwingungszahlen Potenzen von 2, 3 und 5, mit positiven oder negativen Exponenten.

Fig. 1. Buchstabentonschrift.

	−8	−7	−6	−5	−4	−3	−2	−1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	
+II	d	a	e	h	fis	cis	gis	dis	ais	eis	his	fisis	cisis	gisis	disis	aisis	eisis	+II
+I	b	f	c	g	d	a	e	h	fis	cis	gis	dis	ais	eis	his	fisis	cisis	+I
0	ges	des	as	es	b	f	c	g	d	a	e	h	fis	cis	gis	dis	ais	0
−I	eses	bb	fes	ces	ges	des	as	es	b	f	c	g	d	a	e	h	fis	−I
−II	ceses	geses	deses	ases	eses	bb	fes	ces	ges	des	as	es	b	f	c	g	d	−II

B. Das temperierte Tonsystem.

1. **Der Quintenzirkel.** Bildet man, etwa vom Tone d = 1 ausgehend, zwölf Quinten aufwärts, so gelangt man zu cisis, das = 3^{12} = 531441 ist. Die 19. Oktave von d dagegen ist 2^{19} = 524288; die beiden Töne unterscheiden sich um einen gewissen Betrag, den man das **pythagoreische Komma** nennt. Statt der zwölf reinen Quinten denkt man sich nun zwölf etwas tiefer gestimmte Quinten, so zwar, daß der Ton cisis genau gleich dem Tone d wird; solche zwölf temperierte Quinten bilden nun einen **Quintenzirkel**. Diese mitsamt allen ihren Oktaven nennt man das **temperierte Tonsystem**. Die zwölf gleichgroßen Quinten q genügen der Bedingung $q^{12} = 2^{7}$, woraus $q = \text{Num.}\,(^{7}/_{12}).\log 2 = 1{,}4983$ folgt, statt 1,5000, der reinen Quinte. Diese Abweichung ist äußerst gering, was für den Bau von 12-stufigen Tastinstrumenten ein Glück genannt werden darf. Unsere reine Buchstabentonschrift kann auch für das temperierte System gebraucht werden, weil die Verwendung der Temperierung durchaus nicht das Vernehmen der Töne im Sinne der reinen Stimmung ausschließt; wie schon d'Alembert bemerkt hat, ergänzt nämlich das Ohr das, was an der reinen Stimmung fehlt; dadurch wird die Auffassung eine der Theorie reiner Stimmung entsprechende. Dieser Umstand ist von großer Wichtigkeit für die praktische Musik. Sobald ohne temperierte Begleitung musiziert wird, kann immer nur die reine Stimmung gelten, weil die temperierte, ohne begleitende Unterlage, nicht getroffen werden kann. Als Abbild der temperierten Oktave dient der Kreis in umstehender Figur 2. Der Umfang soll

ein Maß der Oktave sein, die 12 Tonstufen sind mit I bis XII bezeichnet. Nun liegt die Frage nahe, wie es denn mit der Abweichung der übrigen musikalischen Intervalle steht. Durch Berechnung der Schwingungszahlen läßt sich die Frage beantworten. Indes benutzen wir diese Gelegenheit, eine andere, schon von Euler begründete Methode darzustellen, die besonders leicht und einfach Schwingungszahlen zu vergleichen gestattet.

2. Logarithmische Schwingungsmaße. Eine jede Zahl kann durch ihren Logarithmus auf beliebig gewählter Grundzahl dargestellt werden. Werden Intervalle aneinandergefügt, so müssen die Verhältniszahlen miteinander multipliziert werden; schließt man z. B. an die Quinte c—g eine große Terz g—h, so findet man aus $^3/_2 . ^5/_4$ die Zahl $^{15}/_8$, also c:h = 8:15. — Wird dagegen das Schwingungsverhältnis durch Logarithmen angegeben, so hätte man die entsprechenden Zahlen der Quinte und Terz nur zu addieren. Es sei nämlich i ein beliebiges Intervall; dann setzen wir

$$a^k = i,$$

und es kann nun k, statt i, als Merkzahl des Intervalls dienen. Für ein anderes Intervall sei $a^{k_1} = i_1$; alsdann wird das zusammengesetzte Intervall $i . i_1 = a^k . a^{k_1} = a^{k+k_1}$ sein; es sind also die Merkzahlen k und k_1 zu addieren. Ueber die Grundzahl a dürfen wir zweckmäßig verfügen. Die Grundzahl 10 erscheint ungeeignet, weil für die Oktave i = 2 sein soll, aber $10^{k_0} = 2$ ergäbe für k_0 eine irrationale Zahl. Euler setzte $a^k = 2$, und verlangte k = 1 für i = 2, d. h. für das Intervall der Oktave sollte k von 0 bis 1 anwachsen. Nun gibt die Gleichung

$$a^k = i \text{ für } k = 0,\ i = 1,$$

und für k = 1, i = 2, nur dann, wenn a = 2 angenommen wird. Nun wird $2^k = i$ die Gleichung ergeben:

$$k = \log i/\log 2.$$

Wir berechnen zunächst die reinen Quinten und Terzen nach diesem Logarithmenmaß: Für die Oktave wächst k, der Logarithmus, von 1 bis 2. Für die Quinte, weil $i = ^3/_2$, wird q = (log 3 — log 2)/log 2 = 0,58496 und für die große Terz, weil $i = ^5/_4$ ist, t = (log 5 — log 4)/log 2 = 0,32193. Es fügt sich glücklich, daß diese beiden Zahlen sich abrunden lassen auf drei Stellen. Nichts hindert aber die Oktave, statt als ein Ganzes, in 1000 Teile geteilt anzusetzen; dem entspricht die Forderung, daß für k = 1000, = 2
k
werden solle. Dann erhält man $2^{1000} = i$, d. h. wir wählen als Grundzahl statt der Zahl 2
k
deren 1000. Wurzel. Es ist nunmehr $2^{1000} = i$, also für die Quinte wird

$$q = 1000 . (\log {}^3/_2)/\log 2) = 585^{\mu o}$$

und für die große Terz

$$t = 1000 ((\log {}^5/_4)/\log 2) = 322^{\mu o},$$

welche abgerundete Zahlen in ganzen Milliektaven (μo) innerhalb weiter Grenzen gelten können.

3. Logarithmische Buchstabentonschrift. In Figur 3 wurde die Mittellinie von d bis cisis und eses aufgeführt, mit Hinzufügung aller Logarithmen. Die zweite Quinte von d gäbe 2×585 = 1170μo. Da aber die Oktave 1000μo ausmacht, darf man ohne weiteres die 1 vorn fortlassen, wodurch der Logarithmus in die Nachbarschaft des Tones d führt. Jede Horizontalreihe wird durch Hinzufügung von 585 gebildet. Die terzverwandte nächste Quintgeneration ist ebenso durch die Unterschiede 585 gekennzeichnet, nur ist der Anfangston, z. B. fis durch 322 gegeben, und für b durch 1000—322 = 678. Die Reihen wurden nur bis cisis und eses hingeschrieben; endlich beginnt die dritte Quintgeneration nach oben mit cisis und die dritte nach unten mit ceses. Es ist nun äußerst bequem, ein beliebiges Intervall zu bestimmen; man bildet nur die Differenz der Logarithmen; z. B. as — gis = 508 — 492 = 16μo.

4. Logarithmischer Quintenzirkel. In Figur 2 wurden die Quintenzahlen über den Kreis verteilt. Der in 1000 Teile geteilte Umfang stellt die Oktave dar, die Quinte a kommt auf 585 und die Unterquinte g auf 415. Es folgen in derselben Weise die Quinten nach oben und unten bis cisis und eses, also ist es eine Abbildung der ganzen Mittellinie der Fig. 1. Man sieht deutlich, wie die letzten Quinten beiderseits um 20μo abweichen. Dieses pythagoräische Komma ist es, das im temperierten System ausgeglichen wurde. Ebenso weichen as und gis um 20μo voneinander ab. Das syntonische Komma ersieht man aus fis — fis oder aus b — b = 18μo.

5. Die temperierte Tastatur. Da die zwölf temperierten Quinten gleichgroße Intervalle sind, so müssen Töne innerhalb einer Oktave, gleichweit voneinander entfernt, nebeneinander liegen. Die zwölf Stufen heißen Halbtonstufen. Die Quinte von d bildet die siebente Halbtonstufe. Es entsteht also durch Anreihung der Quinten die Stufenzahlfolge:

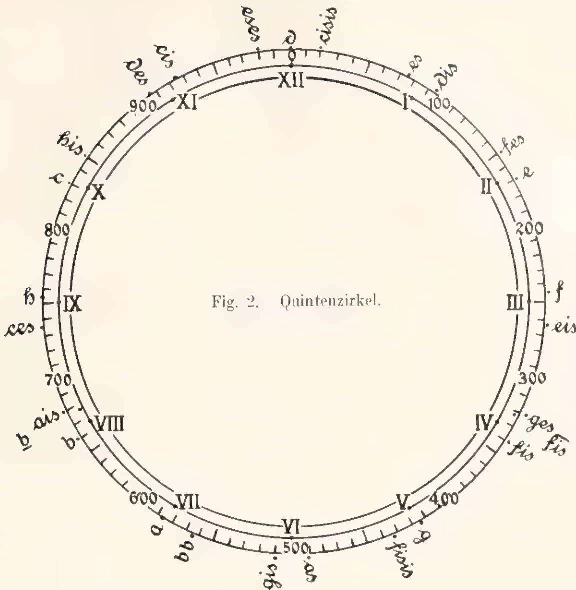


Fig. 2. Quintenzirkel.

0	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84
d,	a,	e,	h,	fis,	cis,	gis,	dis,	ais,	eis,	his,	fisis,	d
0	7	2	9	4	11	6	1	8	3	10	5	0

Die untere Zahlenreihe entstand, indem die Vielfachen von 12 von der oberen Reihe abgezogen wurden. Ordnet man nun diese Töne nach der Stufenfolge und bildet dieselbe Vornahme mit den unteren Quinten von d bis eses, so ergibt sich die folgende Tonreihe für die Tasten des temperierten Tonsystems:

→												
0,	1,	2,	3,	4,	5,	6,	7,	8,	9,	10,	11,	12.
(d),	dis,	(e),	eis,	fis,	fisis,	gis,	(a),	ais,	(h),	his,	cis,	cisis.
eses,	es,	fes,	(f),	ges,	(g),	as,	bb,	b,	ces,	(c),	des,	(d).
12,	11,	10,	9,	8,	7,	6,	5,	4,	3,	2,	1,	0
←												

Alle Tasten erscheinen unter Doppelnamen, entsprechend der Mittellinie der Buchstabentonschrift. Die weißen Tasten wurden hervorgehoben. Wir schließen noch die Abweichungen der Hauptintervalle von der Reinheit hier bei: zu jedem Intervall wurde das Ergänzungsintervall gebildet, wie wir das gleich nebenan angeführt haben:

Reine und temperierte Intervalle nach Logarithmenmaß in Millioktaven:

Intervall		Logar.-maß		Abweichung Milliokt.	Ergänz.-Interv.		Log.-maß	
Name	Schw.-Z.	rein	temp.		Name	Schw.-Z.	rein	temp.
Quinte	2:3	585	583,3	— 1,6..	Quarte	3:4	415	416,6
gr. Terz	4:5	322	333,3	+ 11,3..	kl. Sext	5:8	678	666,6
kl. Terz	5:6	263	250	— 13	gr. Sext.	3:5	730	750
gr. Ganzton	8:9	170	166,6	— 3,3	kl. Sext	9:16	830	833,3
kl. Ganzton	9:10	152	166,6	+ 14,6..	kl. Sept	5:9	847	833,3
pyth. Terz	64:81	340	333,3	— 6,6..				
p. kl. Terz	27:32	245	250	+ 5				
gr. Chroma	c:cis	77	83,3	+ 6,3..				
kl. Chroma	c:cis	59	83,3	+ 24,3..				

Den 5 Hauptintervallen haben wir noch einige, später zu beachtende hinzugefügt. Ersichtlich sind die starken Abweichungen aller temperierten Terzen; auch fehlt gänzlich der Unterschied der Ganz- und der der Halbtöne und Chromas, wodurch die temperierte Tonleiter viel an Richtigkeit vermissen läßt.

7. Das logarithmische Halbtonstufenmaß. Bei diesem Maß teilt man die Oktave in 12 Teile oder besser in 1200 Teile; dadurch erscheint der temperierte Halbton in hundert Teile geteilt. Da man leicht eine Vorstellung dieser Tonstufe hat, so ist es nicht unzweckmäßig, die Abweichungen in Hundertstel dieses Halbtones anzugeben; dazu braucht man aber nur die Oktavmaßzahlen mit 1,2 zu multiplizieren; die Grundzahl dieses Logarithmensystems wird dann die 12. Wurzel aus 2 sein.

8. Das 53stufige temperierte System praktisch reiner Stimmung. Es gibt in der Tat ein temperiertes System, das als praktisch vollkommen rein angesehen werden kann, und da sich in diesem eine äußerst vollkommene Tastatur erbauen läßt, wie sie bereits von Bosanquet in Oxford ausgeführt worden ist, so wollen wir dieses merkwürdige System eingehend schildern. Die Araber hatten schon im 12. Jahrhundert entdeckt, daß die 53. Quinte fast genau gleich dem Anfangstone wird; es ist nämlich $53 \times 584{,}9625 = 31{,}0030$, d. h. $= 31$ ganzen Oktaven $+ 3$ Millioktaven. Denkt man sich nun diese 53. Quinte = dem Anfangstone, so brauchte man nur die 3 Millioktaven auf die 53 Quinten zu verteilen, d. h. eine jede Quinte um 0,06ºº tiefer zu stimmen. Aber dieser Betrag kann überhaupt praktisch nicht mehr erreicht werden, oder mit anderen Worten, auch wenn man die 53 Quinten rein stimmte, wäre es schwer, den kleinen Betrag der Abweichung zu erreichen. Nun muß aber sofort noch gefragt werden, wie es mit der Reinheit der Terzen steht und ob in der Reihe der 53 Quintentöne es einen geben sollte, der der reinen großen Terz fast gleichkäme. In der Tat stimmt die achte untere Quinte des Ausgangstones sehr gut mit dieser Forderung überein. Die achte Unterquinte ist ges = 320, während wir die Terz von d gleich $\overline{\text{fis}}$ = 322 suchen; es findet eine Abweichung von nur 2 Millioktaven statt, also von etwa $^1/_{40}$ eines Halbtones. Diese Reinheit ist praktisch vollkommen hinreichend. Dieselbe Abweichung erhielte jede andere große Terz. Ferner ließ sich die Tastatur so einrichten, daß jenes ges = fis dicht unter fis zu stehen kam, so daß der Griff d—fis—a ganz bequem zur Hand lag. Dasselbe gilt für alle anderen Durakkorde.

Fig. 3. Buchstabentonschrift nebst Logarithmen der Schwingungszahlen.

												cisis 966	gisis 551	disis 136	aisis 721	eisis 306								
								fis 304	cis 889	gis 474	dis 059	ais 644	eis 229	his 814	fisis 399	cisis 984	gisis 569	disis 154						
					f 237	c 812	g 397	d 982	a 567	e 152	h 737	fis 322	cis 907	gis 492	dis 077	ais 662	eis 247	his 832	fisis 417	cisis 002				
eses 980	bb 565	fes 150	ces 735	ges 320	des 905	as 490	es 075	b 660	f 245	c 830	g 415	**d** 000	a 585	e 170	h 755	fis 340	cis 925	gis 510	dis 095	ais 680	eis 265	his 850	fisis 435	cisis 020
				eses 998	bb 583	fes 168	ces 753	ges 338	des 923	as 508	es 093	b 678	f 263	c 848	g 433	d 018	a 603	e 188	h 773					
						deses 846	asas 431	eses 016	bb 601	fes 186	ces 771	ges 356	des 941	as 526	es 111	b 696								
								ceses 694	geses 279	deses 864	asas 449	eses 034												

9. Das 53stufige Instrument. Wegen der ausgezeichneten Eigenheiten dieses von Poole erdachten, von Bosanquet ausgeführten Instrumentes wollen wir die wichtigsten Eigenheiten kurz zusammenstellen: a) Die Tastatur ist eine für 53 Quinten in ganz gleicher Weise fortschreitende Reihe. Man gehe im Manuale (Grundriß Fig. 4) unten von einem f aus und verfolge die 7 Quinten f, c, g, d, a, e, h; eine jede von ihnen ist in zwiefacher Weise gegen die vorige verstellt, indem z. B. c im Vergleich zu f nicht in derselben Horizontalebene liegt, sondern um ein kleines Stück gehoben worden ist; auch ist c ein wenig nach vorn gerückt. Letztere Verrückung erkennt man an der Grundrißabbildung (Fig. 4), ersteres, die folgweise Erhebung, am Aufriß (Fig. 5). b) Die auf h folgenden 5 Tasten sind ganz wie vorhin aufgebaut, wie man am Grundriß deutlich ersieht, nur sind die 5 Tasten fis, cis, gis, dis, ais schwarz oder dunkel gefärbt, während

Fig. 4. Grundriß der 53stufigen Tastatur.

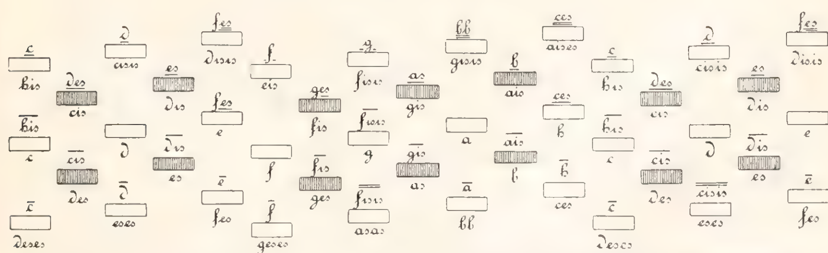


Fig. 5. Aufriß des mittleren Teiles der 53stufigen Tastatur des reingestimmten Harmoniums von Bosanquet.

ihre Form dieselbe ist, wie die der hellen Tasten. c) Die Folge dieser Anordnung ist, daß man sich durch den bloßen Anblick leicht zurecht findet und ferner, daß alle Intervalle und Akkorde ganz gleiche Lage haben. d) Beim 12stufigen Instrument gibt es 6 verschieden geartete Dur- und Mollakkordarten hinsichtlich der Lage der drei Tasten, beim 53stufigen je nur einen Typus, so daß man im Dunkeln durch bloßes Tastgefühl nicht unterscheiden kann, welchen Dur- oder Mollakkord man greift. Aehnliches gilt für jeden beliebigen anderen Akkord. e) Beim 53stufigen ist von h nach fis kein solcher Sprung in der Lage, wie beim 12stufigen; ebenso führt die letzte zwölfte Quinte ais nach eis, so aber, daß eis = f dicht über dem Anfangstone f zu liegen kommt (Aufriß Fig. 4). f) Es ist ersichtlich, daß, wenn die Tastenlänge k und die Erhebung von eis über f gleich h gesetzt wird, jede neu gebildete Quinte um k/12 gehoben und um h/12 nach vorn verschoben ist. g) Entsprechend sind nun im ganzen 5 × 12 Quinten übereinander gebaut, mithin 60 Töne in einer Oktave untergebracht, von denen die letzten sieben völlig gleich sind den ersten sieben Tönen; von diesen letzten sieben Tönen wurde nur die erste fes =a(is), in die Zeichnung aufgenommen. h) Die ganze Tastatur, obwohl aus gleichen Quinten aufgebaut, läßt sich auch als aus 53 Oktavteilen zusammengesetzt ansehen, gerade so wie bei 12stufiger Temperierung die Oktave in 12 gleiche Halbtöne geteilt ist. i) Der 53. Teil einer Oktave ist aber gleich 18,868 Millioktaven, also fast gleich dem syntonischen Komma 17,91; die Abweichung von 0,96‰ ist nicht unterscheidbar. k) Es besteht also das ganze System aus 53 gleichen Kommastufen, die so wie in Figur 5 übereinander stehen. Hiermit ist zugleich den Anforderungen an reingestimmte, bequem liegende Terztöne genügt, denn cis, die achte Quinte des Ausgangstones f, ist = des, also zugleich die reine Unterterz von f. l) Dadurch kann eine jede Taste mehreren Tönen reiner Stimmung entsprechen, z. B. eis = f = geses oder hisis = cis = des = eses usw. — Von solchen Namen sind nur wenige in den Grundriß aufgenommen worden. m) Die Orientierung im System wird dadurch keineswegs verwickelt, sondern bedeutend erleichtert, weil die Quint- und die Terzverwandtschaft sich sofort als die nächste und völlig hinreichende Benennung einer Taste darbietet. n) Man suche z. B. zu c im Grundriß die vierte Quinte e, so findet man sofort um eine Tastenlänge nach unten auch die Taste e, die, wie bewiesen, tiefer als e gestimmt ist. Es kann mithin die Tastatur auch als ein übereinander aufgebautes System von terzverwandten Quintgenerationen aufgefaßt werden o) Folgende Intervalle kennzeichnen das System:

Reine große Terz	= 321,93 Millioktaven
Auf dem Instrument	= 320,76, also Unterschied —1,17‰.
Reine kleine Terz	= 263,03
Auf dem Instrument	: 264,15, also Unterschied + 1,12‰
Reine Quinte	= 584,96
Auf dem Instrument	= 584,908 Unterschied —0,052‰.

p) Als temperiertes und zugleich praktisch völlig reines Instrument dürfte es kaum jemals von einer anderen Tastatur übertroffen werden. Das Harmonium von Carl Eitz in Eisleben ist kein temperiertes Instrument, sondern ein völlig rein gestimmtes. Wir wollen die wesentlichsten Eigenheiten, besonders im Gegensatz zum Bosanquetschen andeuten: a) Die Anordnung der Tasten ist eine jenem ähnliche, sofern eine jede neue Quint nach vorn geschoben und gehoben wurde. In beifolgendem Grundriß (Fig. 6) wurden die Tasten einer Quintgeneration, außer durch Buchstaben noch durch Kreise ◯ hervorgehoben. Man beginne unten mit as und verfolge in Quintschritten nach der Höhe hin, oder, was dasselbe ergibt, in Quartschritten nach der Tiefe hin, die Tasten: as, es, b, f, c, g, d, a, e, h, fis, cis, gis. Dieses gis ist mithin, wenn as = 1 gesetzt wird, gleich 12 × 584,96 = 7,01952, also 19,52 Millioktaven höher als as. b) Wie aus der Figur ersichtlich, sind die Quinten folgweise so vorgeschoben, daß die Quinte gis nach vorn und oben gerückt ist, so daß noch drei Tastenlängen zwischen as und gis Platz finden. c) Unter allen mit einem Kreise ausgezeichneten Tasten wurden die einer zweiten terzverwandten Generation angebracht:

c, g, d, a, e, h, fis, cis, gis, dis, ais, eis, genau um ein Komma gegen die vorige Generation tiefer gestimmt. d) Sucht man zu c—g die große Terz e, so findet man sie sehr praktisch in fast gleicher Höhe zwischen c und g liegend. Sucht man zu g die große Unterterz es, so erkennt man bald, daß es auch sehr bequem zwischen c und g liegt. Es gehört dieses es einer Unterterzgeneration an, wie der Strich unter es es andeutet. Die gesamte Quintgeneration kann von der linken Ecke an verfolgt werden und zwar liegt jetzt jede Taste über einer solchen der Anfangsgeneration. Wir finden: ces, ges, des, as, es, b, f, c, g, d, a, e, h e) Unter der mit einem Senkekommastrich versehenen terzverwandten Quintgeneration

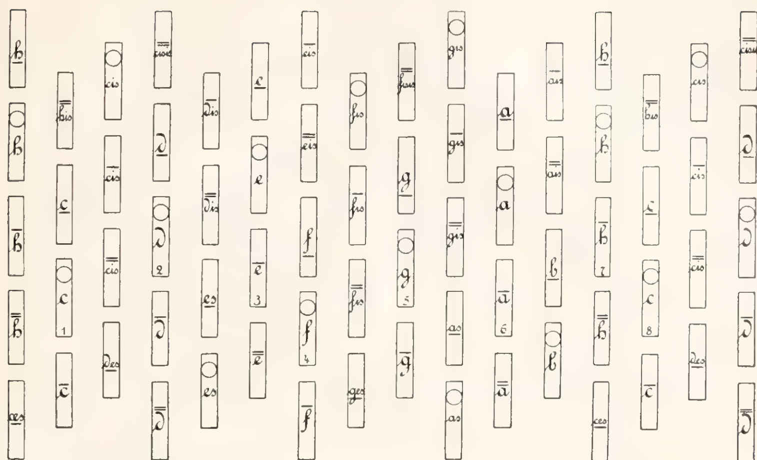


Fig. 6. Grundriß der Tastatur des reingestimmten Harmoniums von Eitz.

hat noch eine weiter doppeltterzverwandte mit zwei Senkekommas versehene Platz gefunden:

d, a, e, h, fis, cis, gis, dis, ais, eis, his, fisis, cisis.

f) Nach diesem Schema könnte eine beliebige Anzahl von Quintgenerationen aufgebaut werden. Tatsächlich benutzt Eitz Registerzüge, um neue, immer um ein Komma erhöhte Generationen einzuführen. In seinem Instrumente sind, der Zeichnung (Fig. 6) entsprechend, vier Quintgenerationen als Tastatur angebracht, während deren im ganzen acht, durch Register eingeschaltet werden können. g) Das Eitzsche Instrument hat die sonst schwarzen Tasten nicht durch dunklere Färbung unterschieden; dem kann natürlich abgeholfen werden. Dagegen sind die vier Quintgenerationen durch Farben unterschieden. Die bei uns mit Kreisen ausgezeichnete ist grün, dann folgen blaue, weiße, rote Tasten. h) Dieses Harmonium soll die wahren syntonischen Kommas e:e = 17,91 zu hören gestatten. Ferner das pythagoreische Komma d — cisis = 19,52 und den Unterschied beider Kommaarten! Es soll auch das „Schisma" zeigen as—gis, das acht Quinten und eine reine große Terz enthält, also 8 × 584,96 + 321,93 = 679,68 + 321,93 = 1001,61, was nur 1,61 ‰ ausmacht! Das ist die in Poole-Bosanquets System vernachlässigte kleine Größe. Ob durch Beobachtungen von Schwebungen das Vorhandensein der vielen Schismaintervalle wirklich bestätigt werden kann, erscheint sehr zweifelhaft; auch dürfte ein Unterschied zwischen den beiden Kommas kaum wahrzunehmen sein, schon weil eine so weit gehende Genauigkeit der reinen Stimmung praktisch unerreichbar, und wenn wirklich erreicht, doch nicht mehr unterscheidbar sein dürfte. h) Das Eitzsche Instrument ist aus den angeführten Gründen schwerer zu handhaben, als das andere. Besonders ungünstig erscheint die Nachbarschaft der blauen und der weißen Tastatur, sobald die Registerzüge der in unserer Zeichnung gegebenen Stimmung entsprechen, denn die blaue ist die zu c gehörige, die weiße aber die zu h gehörige. Diese Quintgenerationen sind um drei Terzschritte voneinander entfernt, haben also nichts miteinander zu tun; freilich kann durch Registerzug statt h eine nahverwandte c-Generation eingeschaltet werden.

Der Verfasser dieses Artikels hat soeben ein Instrument ersonnen, das die Vorzüge der beiden beschriebenen von Bosanquet und Eitz in sich vereinigen soll. Das Instrument befindet sich im Bau und soll noch im laufenden Jahre fertiggestellt sein. Hier können nur die Haupteigenschaften erwähnt werden: a) Die Tastatur entspricht völlig dem Schema der Buchstabentonschrift und zwar eines solchen Teiles, der ein geschlossenes Tonsystem von 53 Stufen darstellt. b) Alle Intervalle sind rein und jegliche Temperierung ist ausgeschlossen. c) Es sind sieben Quintgenerationen aufgenommen, hinreichend für weitgehende Modulationen; eine jede Quintgeneration befindet sich in

einer Höhenebene, während diese Ebenen übereinander so angeordnet sind, daß, wie in der Tonschrift (Fig. 1), die Kreuztöne oben, die vertieften oder Be-Töne unten liegen. d) Für eine bequeme Handhabung der Akkorde ist gesorgt und es gelingt unschwer, jeden Ton an seiner Lage zu erkennen; so z. B. die Töne $\overline{\text{cisis}}$, d, d, d, eses, die, temperiert, einer Taste angehören. e) Das neue Instrument wird allen wissenschaftlichen Versuchen, physikalischen, psychophysischen und musikalischen, in gleicher Weise zugrunde gelegt werden können. f) Die Herstellung der Klaviatur ist wesentlich einfacher als die der oben beschriebenen beiden Instrumente.

II. Musikalische Tonsysteme.

1. Konsonanzbegriff. Tonizität und Phonizität. Es gibt nur zwei Dreiklangsarten, die als völlig konsonant allgemein anerkannt werden: der Dur- und der Mollakkord. Als Tatsache wurde das schon von Zarlino 1558 ausgesprochen. Auch leitete er den Konsonanzbegriff auf die Eigenheiten des harmonischen Klanges zurück. In Figur 7 ist ein System von 5 übereinander stehenden Fünfzeilern verzeichnet, so zwar, daß die Abstände genau den Raum für noch zwei Linien hergeben würden; im ganzen bilden also 33 Einzellinien ein geschlossenes System. Der Schlüssel ist gleich dem gewöhnlichen Baßschlüssel, nur ist der Name D gewählt, um darauf hinzuweisen, daß der allein symmetrisch in der Tastatur liegende Ton d auch hier die Mitte der Symmetrie bildet. Die oberen beiden Fünfzeiler liegen um je zwei und vier Oktaven höher, die unteren beiden um zwei und vier Oktaven tiefer; zwischen je zwei Fünfzeilern befindet sich in der Mitte ein Ton d, der sowohl in bezug auf die obere, wie auf die untere Reihe diesen Namen verdient. Der auf der Mittellinie verzeichnete Ton d zeigt nach oben hin seine ganze Klangmasse, bis zum 16. Oberton (s. den Artikel „Klang"). Die beiden unteren Fünfzeiler geben das zur Obertonreihe symmetrische Bild, die Untertonreihe, d. h. alle die Töne, die den Ton d als Oberton enthalten. Die beiden dem Tone d angehörenden konsonanten Dreiklänge sind d, — fis — a, der Durakkord und g — b — d, der Mollakkord. Sie wurden als 4., 5. und 6. Oberton und Unterton ausgezeichnet. Wenn ein klangreiches d ertönt, so wird das Gehör von der ganzen Obertonreihe erregt. Wenn nun umgekehrt diese drei Töne, d — fis — a, erklingen, so erkennt man sie wieder als ein einem d-Klang gehöriges Gebilde; darum heißt der Akkord ein tonischer Akkord, weil er gleichsam eingespannt ist in die Klangmasse, er erhält das Symbol d+; wir nennen ihn auch Oberklang d oder tonisches d. Dem vorigen entgegengesetzt ist die Erscheinung beim Akkord g, b, d; wenn nämlich diese drei Töne erklingen, so erregen sie ein und denselben Ton d, wie das die Untertonreihe aufweist. Wir nennen deshalb den Akkord einen phonischen, weil alle drei Töne denselben Ton gleichsam singen und geben ihm das Symbol ^{0}d, nennen ihn auch Unterklang d oder phonisches d. Jener Akkord wird auch Dur genannt und dieser Moll, nur wird der Name Moll nicht mit dem Tone d verbunden, sondern mit dem tiefsten der drei Töne g. Das hier aufgestellte Doppelprinzip nennen wir Tonizität und Phonizität. Tonizität ist die Eigenschaft, Bestandteil eines Klanges zu sein, Phonizität ist die Eigenschaft, gemeinsame Obertöne zu haben.

2. Konsonanz der Intervalle. Diese beiden einander entgegengesetzten Eigenheiten begründen den dualen Gegensatz in aller Musik. Nachdem es Helmholtz gelungen war, den Begriff des Klanges klarzustellen, wandte er ihn in der angedeuteten Weise sofort auf die Konsonanz der Intervalle an. Er erkannte, daß ganz allgemein alle zweistimmigen Gebilde tonisch und phonisch ganz gleiche, nur einander entgegengesetzte Eigenschaften haben. Ist das Schwingungsverhältnis m:n, so ist der gemeinsame, tonische Grundton stets gleich 1, und der zusammenfallende oder gemeinsame Oberton gleich m.n, oder, was dasselbe ist, sind die Schwingungsdauern 1/n und 1/m, so hat der gemeinsame Grundton die Dauer 1/n.m und der gemeinsame Oberton die Dauer 1. Je kleiner die Zahlen m und n sind, um so näher sind die Töne des Intervalles miteinander verwandt, um so stärker nämlich sind auch die Schwebungen, die bei geringster Verstimmung eintreten. Das Schema (Fig. 8) bringt Helmholtz für die konsonanten Intervalle. Man findet das Doppelgesetz in jedem Beispiel bestätigt: Die Quinte 2:3 erweist einen Oberton = 6 und den beiden Teilen gemeinsamen Unterton 1; bei der kleinen Sexte 5:8 stimmt der 8. und 5. Oberton überein und ebenso tief liegt der gemeinsame Unterton.

3. Amphibolie der Intervalle. Aus dem Vorstehenden folgt, daß ein jedes zweistimmige Gebilde einen unentschiedenen Charakter hat, da es stets in demselben Grade tonisch wie phonisch konsonant ist. Z. B. kann c—e ebensowohl = c+ wie = ^{0}e sein; auch ist die Quinte c—g ebensowohl = c+ wie = ^{0}g. Mit der Bezeichnung „Amphibolie" soll diese Zweideutigkeit Ausdruck finden. Zu bemerken ist noch, daß bei

einigen Intervallen die Symbole von beiden Tönen abweichen, z. B. ist e—g entweder = c+ oder = ^{0}h.
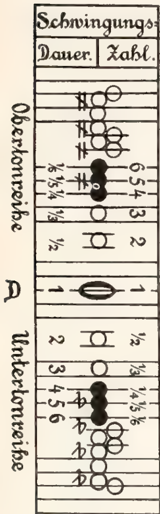


Fig. 7.

4. **Klangvertretung.** Es braucht ein Symbol durchaus nicht immer durch drei Töne vertreten zu werden; auch zwei, ja selbst ein einzelner Ton läßt eine bestimmte Deutung zu, die freilich erst aus der Folge von Akkorden dem Hörer bewußt wird. Tatsächlich wird in der Musik einem jeden Ton ein tonisches oder ein phonisches Symbol zugesprochen, je nach der hervorgerufenen Auffassung. Man nennt das wohl auch Klangvertretung.

5. **Konsonanz der Dreiklänge.** Kehren wir nun zu den Dreiklängen zurück, so erkennen wir bald, daß hier keine Amphibolie mehr statthat; beide Gebilde sind eindeutig konsonant und stehen in scharfem Gegensatz. ! In Figur 9 auf S. 1262 sind die Töne der beiden Dreiklänge d+ und ^{0}d untereinander, je auf der Mittellinie, verzeichnet und zu jedem dieser, durch größere Typen gekennzeichneten Töne sind seine Ober- und Untertöne hinzugefügt. Hier genügte ein System von je drei Fünfzeilern, um die zusammenfallenden Ober- und Untertöne zu erreichen. Die tonische Konsonanz von d+ tritt deutlich hervor unterhalb der drei Töne d, fis und a; ebenso deutlich und genau in demselben Grade „stark" ist das Zusammenfallen der Obertöne bei dem phonischen ^{0}d = g, b und d. Während aber weiter d+ kein rechtes Zusammenfallen der Obertöne hat, läßt sich auch ^{0}d nicht auf gemeinsamen Grundton aufbauen, daher sagen wir: es ist der tonische oder Durakkord phonisch diskordant und tonisch konsonant, dagegen ist der phonische Klang ^{0}d tonisch diskordant und phonisch konsonant. Während also die zweistimmigen Gebilde zweideutig und unbestimmten Charakter haben, sind die Dreiklänge zwar einseitig, aber mit großer Entschiedenheit konsonant. Es hat wohl auch der Durakkord einen gemeinsamen Oberton, aber er steht als cis in entfernter Beziehung zum d; ebenso ist der gemeinsame Unterton es in keiner nahen Beziehung zum d, und niemand wird dem Akkorde g—b—d einen es-Namen geben wollen. Aus der Phonizität des ^{0}d erhellt, weshalb wissenschaftlich der Name Moll zu verwerfen ist. Auch bringt er in die Musik viel Verwirrung.

6. **Akkordfolge.** Folgen einander konsonante Akkorde, so empfindet man sie als wohlgefällig, wenn einfache Beziehungen zwischen ihren Symbolen bestehen. Hierauf allein beruht zunächst das musikalische „Verständnis". Abgesehen

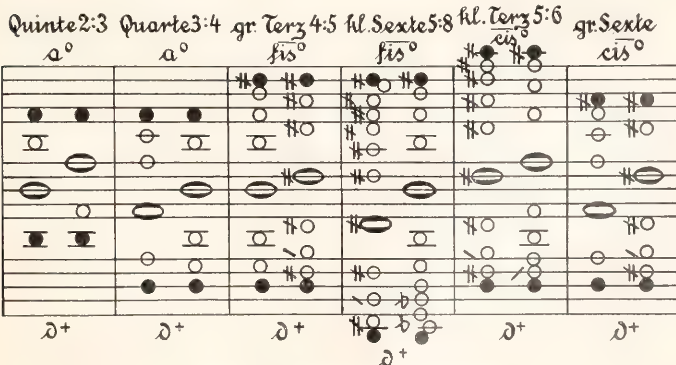
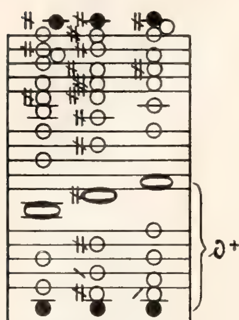
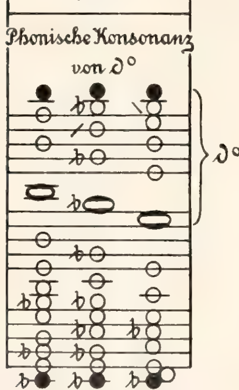


Fig. 8. Zur Amphibolie der Intervalle.





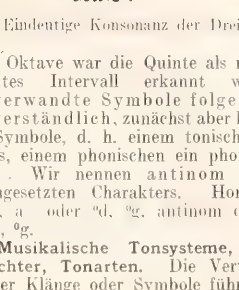


Fig. 9. Eindeutige Konsonanz der Dreiklange.

von der Oktave war die Quinte als nächstverwandtes Intervall erkannt worden. Quintverwandte Symbole folgen einander verständlich, zunächst aber homonome Symbole, d. h. einem tonischen ein tonisches, einem phonischen ein phonisches Symbol. Wir nennen antinom Folgen entgegengesetzten Charakters. Homonom sind d+, a+ oder °d, °g, antinom d+, °d oder d+, °g.

7. Musikalische Tonsysteme, Tongeschlechter, Tonarten. Die Verwandtschaft der Klänge oder Symbole führt zum Aufbau von Tongeschlechtern. Zu einem als Mitte gedachten Symbole fügt man die beiden Seiten hinzu, das Symbol der oberen und der unteren Quinte, und bildet durch je drei homonome Akkorde ein tonisches und ein phonisches Geschlecht:

	g+		d+		a+	
d^{τ}:	g — h — d		d — fis — a		a — cis — e	
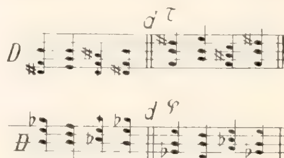
	°g		°d		°a	
d^{φ}:	e — es — g		g — b — d		d — f — a	

Ordnet man dieses Tonmaterial für ein jedes der beiden Geschlechter nach der Tonhöhe und fügt sogleich die Schwingungszahlen hinzu, so findet man:
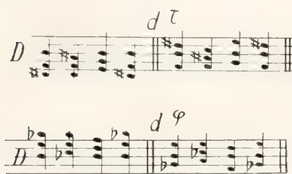
	→							
	d,	e,	fis,	g,	a,	h,	cis,	d
d^{τ}:	1,	$^9/_8$,	$^5/_4$,	$^4/_3$,	$^3/_2$,	$^5/_3$,	$^{15}/_8$,	$^2/_1$
	G	g	H	G	g	G	H	

	←							
	d,	es,	f,	g,	a,	b,	c,	d
d^{φ}:	$^1/_2$,	$^8/_{15}$,	$^3/_5$,	$^2/_3$,	$^3/_4$,	$^4/_5$,	$^8/_9$,	1
	H	G	g	G	H	g	G	

Das tonische Geschlecht heißt d-Dur oder d-tonisch, Zeichen d^{τ}; das phonische Geschlecht heißt g-Moll oder d-phonisch, Zeichen d^{φ}. Die Schwingungszahlen sind einander reziprok, ihre Logarithmen einander gleich, aber + und —, oder die Logarithmen ergänzen sich zu 1000. Die Durleiter hat aufsteigenden Charakter, so wie ihre Akkorde durch Oberquint und große Oberterz gebildet sind; die phonische Leiter ist absteigend erbaut; ihre Symbole haben vom診tone aus Unterquint und große Unterterz erhalten. Beide Leitern waren schon den Griechen bekannt, die tonische als jonische, die phonische als dorische Leiter; letztere hatte Notennamen, die deutlich den Aufbau von oben nach unten verraten. Es ist erstaunlich, daß mit dem geringen Umfang von je 7 Tönen sich ganz geschlossene, vielstimmige Kunstwerke aufbauen lassen. Doch greift man in der Musik meist weiter hinaus, indem man nahverwandte Akkorde zu neuen Mittelpunkten erwählt und zu nahverwandten Geschlechtern übergeht: das ist die sogenannte Modulation. Eine schlichte Folge der Hauptakkorde nennt man Kadenz:



Im tonischen System ist die obere Seite als stark erkannt worden, im phonischen die untere Seite. Wenn diese dem Schlußakkord vorangehen, so gilt die Kadenz als stark; dagegen als schwach, wenn, wie im folgenden, die schwache Seite dem Schluß vorangeht:



Namentlich im Phonischen wird diese Kadenz als unbefriedigend bezeichnet, was aber nur Folge einer Verwöhnung des Ohres ist, wie später erhellen wird.

8. Die gemischten Tongeschlechter. Außer der homonomen Quintfolge findet sich noch eine durchaus verständliche Folge, nämlich die von antinomen Symbolen eines und desselben Tones, z. B. d^+ und ^0d, genannt antinomer Wechsel, ein Gegensatz, der als solcher lange verkannt worden ist, der aber wesentlich zur Dualität aller Musik gehört. Es fügt sich wunderbar, daß man statt der schwachen Seite den antinomen Gegensatz zum Aufbau eines Systems benutzen kann. Das ergibt für das Zentrum d folgende zwei Geschlechter, die wir halbtonisch, $d^{(\tau)}$, und halbphonisch, $d^{(\varphi)}$, nennen wollen:

d^τ : $\overbrace{g — b}^{^0d}$ $\overbrace{d \quad fis}^{d^+}$ $\overbrace{a \quad cis -- a}^{a^+}$

d^φ : $\overbrace{c \quad es}^{^0g}$ $\overbrace{g — b}^{^0d}$ $\overbrace{d — fis — a}^{d^+}$

Die Akkorde liefern folgende Tonleitern:

——————→

d^τ : d, e, fis, g, a, b, cis, d

d^φ : d, es, fis, g, a, b, c, d
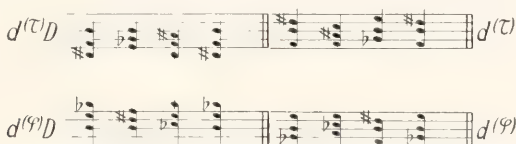
←——————

Die erste Leiter wird auch Halbdur und Molldur genannt, die zweite ist das europäische g-Moll in seiner wissenschaftlich reinen Gestalt, in der Richtung der Pfeile zu intonieren. Um das gangbare Moll zu erhalten, muß man die halbphonische Leiter um eine Quinte versetzen und mit g anfangen, ferner die Richtung umkehren und von unten nach oben intonieren. Es erscheint das Moll als ein stark tonisiertes Geschlecht. Die halbtonische Leiter wird meist nicht besonders gelehrt, doch aber gelegentlich angewandt. Durch Phonisierung sie zu verstümmeln fehlt die Gelegenheit. Versucht man aber dasselbe Verfahren, nur symmetrisch entgegengesetzt, auch hier anzuwenden, so versetze man die Leiter um eine Quinte nach oben, intoniere sie rückwärts und nenne sie A-Dur. Dieses Pseudo-A-Dur, als Leiter, bekäme folgende Gestalt:

←——————

a, b, cis, d, e, fis, g, a

Dieses Pseudo-A-Dur ist das Gegenbild von G-Moll und macht die Verstümmelung des Halbphonischen deutlich sichtbar. Folgende Kadenzen ergeben sich, wobei bemerkenswert ist, daß nunmehr die beiden Tongeschlechter zwei starke Seiten erhalten, denn der antinome Gegensatz bringt immer die starke Seite des fremden Geschlechtes zur Geltung, so daß folgende, stets starke Kadenzen entstehen:

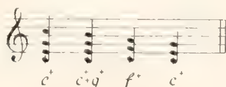


Bisher haben wir nur die Akkorde, wie sie eingeführt wurden, erklingen lassen; doch werden sämtliche Töne der Tonleiter, miteinander verbunden, vorkommen können.

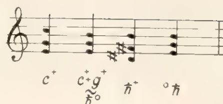
9. Dissonanz und Auflösung. Das Wort Dissonanz stammt daher, daß die Konsonanz der dreistimmigen Akkorde durch Hinzufügen von Tönen anderer Akkorde gestört wird. Dieser Auffassung der Störung eines Zusammenklanges läßt sich eine andere entgegensetzen, die den positiven Charakter trifft. Es können unsere Symbole, wie wir sahen, durch drei, zwei oder einen Ton vertreten sein. Geht man nun von dem Gedanken aus, daß ein Ton der Tonleiter zunächst immer nur in dem Sinn aufgefaßt wird, wie er eingeführt wurde, so erhellt, daß gleichzeitig mehrere Symbole empfunden werden können. Wir kommen so zur Erkenntnis, daß sich der positive Charakter der Dissonanz in folgender Begriffsbestimmung ausdrücken läßt: Dissonanz ist das gleichzeitige Erklingen von zwei oder mehr Kon-

sonanzen; sie ist eine Doppelkonsonanz, die wir auch Bikonsonanz oder kürzer Bissonanz nennen können. Sie wird also auch durch Angabe der Symbole dargestellt, die in den erklingenden Tönen vertreten sind. Auflösung nennt man nun den Akkord, der der Dissonanz folgt und für sie gilt der Satz: Die Auflösung besteht aus Symbolen, die zu den Teilen der Dissonanz verständlich folgen können. Die Auflösung kann auch selbst wieder Dissonanz sein. Befriedigend indessen schließt, mit wenigen Ausnahmen, nur eine Konsonanz, wenn auch noch so viel Dissonanzen vorangegangen sein mögen. Bemerkenswert ist der Reichtum an schönen Dissonanzen der gemischten Geschlechter, was durch Einführung des antinomen Gegensatzes bedingt ist. Doch gibt es noch in der praktischen Musik Dissonanzen, die sich weder in den reinen, noch in den gemischten Geschlechtern vorfinden, woraus folgt, daß man sich nicht starr an die aufgestellten Tonsysteme bindet, sondern in die nächstverwandten Quintakkorde hinübergreift. Wir müssen es uns versagen, hierbei länger zu verweilen, weil das Gebiet zu groß ist, um es in Kürze abtun zu können. Einer Eigenheit aber wollen wir hier noch gedenken; es ist eine beachtenswerte Tatsache, daß die empfundene Symboldeutung, wie wir sie kennen lernten, durch die Akkordfolge sich zuweilen in eine andere Symboldeutung umgestalten kann, wodurch scheinbar fernverwandte Tonarten in nahe Beziehung treten können.

10. Modulation, Metharmose, Enharmose. Wir nehmen sogleich ein Beispiel vor, an dem sich die Gesetze kundtun. In folgender Akkordfrage ist der zweite Zusammenklang offenbar bissonant; die Symbole wurden unter den Noten verzeichnet.



Läßt man hier den tiefsten Ton fort, so ist die Symboldeutung keine andere und man empfindet zwar, daß weniger Töne vorkommen, aber eine Aenderung der Auffassung ist nicht vorhanden. Das Gebilde e—g—h aber, das hier als bissonant auftritt, kann auch als phonischer Akkord = °h gelten. Er bildet daher eine „Scheinkonsonanz", solange er als Teil von c-Dur mit doppeltem Symbol empfunden wird. Die phonische Deutung aber kann erzwungen werden durch eine andere Akkordfolge:



Das Zeichen ⁓ bedeutet Metharmose oder Aenderung der Symbole. Die plötzliche Umwandlung der empfundenen Symboldeutung muß als Tatsache anerkannt werden, wenn auch eine psychologische Erklärung schwierig sein mag. Das Wesentliche hierbei ist der Umstand, daß das musikalische Verständnis keineswegs gestört erscheint; es tritt vielmehr eine reichere Beziehung der Akkorde und der Tonsysteme zueinander auf. Wenn, wie in vorstehendem Beispiele, es eine Scheinkonsonanz ist, die durch die Akkordfolge umgedeutet wird, so heißt der Vorgang Metharmose. Eine solche findet hauptsächlich zwischen sogenannten Paralleltonarten statt; darunter versteht man zu einem tonischen Geschlecht das phonische der Oberterz, zu einem phonischen Geschlecht das tonische der Unterterz. Die Erklärung findet man in der Amphibolie der großen Terz; es kann c—e sowohl c+, als auch °e sein. Diese Terz in c-Dur hat das Symbol c+, in $\bar{e}^{\varphi}$ das Symbol °e. Metharmose besteht immer in einem Hinüberspielen der Symboldeutung aus dem Tonischen ins Phonische oder umgekehrt. Während bei der Metharmose die Töne in der neuen Auffassung unverändert fortbestehen, kommen auch Umstimmungen vor, so aber, daß die Taste der 12 stimmigen Temperierung dieselbe bleibt, z. B. wenn fis in ges sich wandelt. Insbesondere geben die gemischten Geschlechter Anlaß zu schönen Umdeutungen dieser Art. Man nennt diese Umdeutungen mit Aenderung der Stimmung Enharmose; der zu ändernde Ton unterliegt einem „enharmonischen Wechsel", z. B. wenn in c^{τ} der Akkord as—h—d—f = °c + g+ sich nach c+ auflöst, so besteht die ursprüngliche Symboldeutung °c + g+; folgt aber ein Akkord a—c—e, und läßt hierfür die weitere Folge die Deutung °e zu, so wird as—h—d—f umgestimmt und zugleich umgedeutet in gis—h—d—f = e+ + °a. Dem enharmonischen Wechsel unterlagen hier 2 Töne: gis und d, es wird as ≃ gis und d ⁓ d; das Zeichen ~ bedeutet enharmonischen Wechsel, ⁓ metharmonischen Wechsel.

11. Akustische und musikalische Konsonanz. Diese beiden Begriffe sind durchaus zu unterscheiden. Schon bei den Schein-

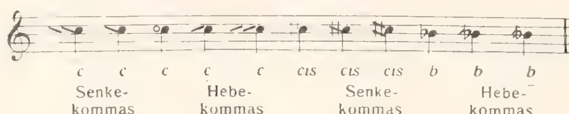
konsonanzen, wie a—c—$\bar{e}$ in c-Dur, das wir bissonant f+ + c+ finden, zeigt es sich, daß ein Gebilde akustisch konsonieren kann, während die musikalische Auffassung eine Doppelkonsonanz empfindet. Man könnte zur Vereinfachung die bloß akustische Konsonanz mit dem Worte **Konkordanz** bezeichnen; dann hieße es: Scheinkonsonanzen sind zwar konkordant, aber bissonant. In noch anderem Sinne macht sich dieser Unterschied geltend. Bei Herleitung der konsonanten Dreiklänge pflegt man mit dem 6. Teiltone aufzuhören, den siebenten und die ferneren Obertöne nicht zu beachten. Gerade der siebente Ton ist von Theoretikern oft zur Erklärung der Septime herbeigezogen worden. Indes geht das musikalisch nicht an, weil in der Nähe des siebenten Teiltones sich eine andere Beziehung musikalisch geltend macht, nämlich die doppelte Unterquint, z. B. der Ton b in bezug auf c. Ebenso dürfen die Teiltöne 11, 13 usf. wohl zur akustischen Konkordanz hinzugerechnet werden, musikalisch sind sie diskordant. Versuche, die die Psychologen anstellen, beziehen sich wohl stets auf die rein akustischen Erscheinungen.

12. **Melodie** ist die Aufeinanderfolge von Tönen, die meist einem geschlossenen Tonsystem oder einer **Tonart** angehören. Jeder Melodieton, da er ein Teil eines ins Geschlecht eingeführten Dreiklanges ist, unterliegt dem entsprechenden Klangsymbol, m. a. W. jeder Melodieton hat eine harmonische Grundlage. Auch hier gibt es verschiedene Richtungen in der Wissenschaft. So hat **Helmholtz** einen anderen Standpunkt vertreten, demgemäß zuerst die Melodie sich in der Menschheit entwickelt haben solle, unabhängig von aller Harmonie; erst viel später sei die Harmonie hinzugetreten. Andere meinen, es müsse, wenn auch unbewußt, immer eine harmonische Grundlage empfunden worden sein, denn sonst würden die Melodietöne nicht ins harmonische Gefüge sich ordnen lassen.

13. **Monismus und Dualismus.** In der älteren Lehre herrscht Monismus, worunter zu verstehen ist, daß **ein jeder Akkord** sich über einem Grundbaß aufbaut und von unten nach oben, der Tonhöhe nach, gebildet sei. Eine allgemein verbreitete Lehrmethode gründete sich auf dieser Anschauung, der **Generalbaß**. Zum Monismus gehört auch die gangbare Molltheorie, die den Mollakkord vom Grundbaß herleitet. Sie nennt den Dreiklang g—b—d g-Moll und unterscheidet ihn dadurch vom Durakkord, daß er statt einer großen, eine **kleine Terz** über dem Grundtone hat. Hierbei wird übersehen, daß die kleine Terz durchaus nicht den Rang einnehmen kann wie die große Terz, denn bei ihrem Schwingungsverhältnis 5:6 enthält sie **beide** Faktoren, 3 und 5, während die große Terz mit dem Verhältnis 4:5 nur den **einen** Faktor 5 enthält. Der Dualismus, den der Berichterstatter hauptsächlich entwickelt hat, verkennt nicht, daß man musikalisch oft und gern den Grundbaß in der Tiefe beläßt, glaubt aber deshalb allein nicht den Aufbau von oben nach unten, der sich in mehreren Beziehungen kundtut, aufgeben zu müssen. Schon **Zarlino** hat im 16. Jahrhundert den entgegengesetzten Charakter des Phonischen erkannt und auf die Teiltöne zurückgeführt. Später hat **Rameau** die Tatsache wieder betont und M. **Hauptmann** entwickelte bereits die reinen und gemischten Geschlechter im rein dualen Sinne. Schließlich hat erst der Berichterstatter das ganze System des Dualismus nebst Dissonanzlehre und Modulation ausgebaut. Da nun die wissenschaftliche Grundlage des Dualismus eine feste ist, gewinnt, wie es scheint, diese Lehre immer mehr Anklang. Dem Generalbaß ist namentlich von **Riemann** ein **Generaldiskant** entgegengesetzt worden, sofern die Akkorde nicht nur vom Baß aus, sondern ebenso oft vom Sopran aus aufgebaut erscheinen. — Diese beiden Methoden, Generalbaß und Generaldiskant, sind übrigens nur Verständigungsmittel, ohne rechte wissenschaftliche Grundlage, weil die Töne eines Akkordes nach **temperierten Tonstufen** abgezählt werden, von unten nach oben oder umgekehrt, wobei die reine Stimmung völlig vernachlässigt wird. Immerhin haben die Methoden ihren Wert, weil man **unter Vorbehalt genauerer Festsetzung der Stimmung**, die Stufenzählung als zweckmäßig gelten lassen kann. Für den Anfang im Unterricht erscheint diese Zählmethode unentbehrlich; die reine Stimmung brächte am Anfang zu viel Schwierigkeiten. Vor einem Mißverständnis muß noch gewarnt werden: Wir haben gesehen, daß Dissonanzen Doppelkonsonanzen sind. Diese Auffassung ist durchaus noch kein Kennzeichen von Dualismus. Es gibt nämlich im Gegensatz zu unserer Darstellung der Dissonanz einen Standpunkt, der den alten Begriff der störenden oder dissonierenden Töne festhält; ihm sind die Doppelkonsonanzen unbequem, er versucht auch die dissonanten Akkorde auf einem Grundbaß aufzubauen und wenn er Dualist ist, nimmt er den Aufbau unter dem Diskant hinzu. Der Monist baut zwar seine Akkorde nur aus der Tiefe in die Tonhöhe hinauf, aber es stört ihn dabei nicht die Anschauung, daß Dissonanzen Doppelkonsonanzen sind. Die Dissonanzlehre hat nichts über diese Frage zu entscheiden; es kommt eben nur in Betracht, ob **der Aufbau auch von oben nach der**

Tiefe hin zugestanden wird. Monisten leugnen einen solchen.

14. **Kunstanalyse.** Der ästhetischen Beurteilung eines Kunstwerkes muß eine formale Analyse voraufgehen. Sie beginnt mit einer Uebertragung der temperierten Notenschrift in Reinschrift, was zugleich mit der Feststellung aller Symbole der Akkorde ausgeführt werden muß. Hiernach folgt die tonale oder funktionale Analyse, d. h. die Feststellung der vorkommenden Tonarten und in diesen die Stellung der vorkommenden Akkorde zum Mittelpunkt des Systems. Zur Herstellung der Reinschrift in Noten dient eine geringfügige Aenderung der üblichen Notenschrift, denn, da trotz gleicher Tasten doch die Kreuznoten von den b-Noten unterschieden werden, so muß nur noch eine Unterscheidung aller Kommastriche hinzugefügt werden, was nach folgendem kleinen Muster geschieht:



Diese Zeichen sind hinreichend, weil bei Kreuznoten Hebekommas niemals vorkommen, ebenso bei vertieften Noten keine Senkekommas. Bei der Symbolanalyse ist die Verständlichkeit der sich folgenden Akkorde zu prüfen und unter allgemeine Gesetze zu bringen. Neben dem homonomen Quintschritt kommt nur noch der antinome Wechsel vor und eine vorgreifende Symbolfolge, d. h. es folgen sich Akkorde, die einen vermittelnden vermissen lassen; dieser aber folgt alsdann nachher befriedigend. Jeder Wandel des Tongeschlechtes ist festzustellen, wobei meist Enharmose oder Methamose statthat; solche fehlen nur bei Quintschritten. Die tonale Analyse endlich untersucht die Stellung aller vorkommenden Konsonanzen und Dissonanzen zum Mittelpunkt des Systems. Da es außer dem mittleren nur noch zwei Seitenakkorde enthält, so sind auf diese drei Gebilde alle übrigen zu beziehen. Im dualen System unterscheidet man folgende Bezeichnungen: Der Zentralton des Geschlechtes heißt

Tonika, z. B. d^{τ},
deren Akkord: d—fis—a = d+.
Die obere Quinte heißt:
Dominante, Ton a,
deren Akkord: a—cis—e = a+.
Die untere Quinte heißt:
Subdominante, Ton g,
deren Akkord: g—h—d = g+.

Phonika, z. B. d^{φ},
deren Akord: g—b—d = °d.
Die untere Quinte heißt:
Regnante, Ton: g,
deren Akkord: c—es—g = g°.
Die obere Quinte heißt:
Oberregnante, Ton a,
deren Akkord: d—f—a = °a.

In gemischten Geschlechtern:

Tonika, Ton $d^{(\tau)}$,
deren Akkord: d—fis—a = d+.
Die obere Seite heißt:
Dominante a,
deren Akkord: a—cis—e = a+.
Die untere Seite heißt:
Regnante d,
deren Akkord: g—b—d = °d.

Phonika $d^{(\varphi)}$,
deren Akkord: g—b—d = °d.
Die untere Seite heißt:
Regnante g,
deren Akkord: c—es—g = °g.
Die obere Seite heißt:
Dominante d,
deren Akkord: d—fis—a = d+.

Es hat Riemann die funktionale Analyse als Hauptaufgabe bezeichnet; doch scheint dem Berichterstatter die symbolische Analyse wichtiger, sofern sie ausführbar bleibt, selbst dann, wenn, wie das oft vorkommt, das Tongeschlecht nicht mit Sicherheit aus der Akkordfrage sich bestimmen läßt. Zudem ist die Mannigfaltigkeit vorkommender Dissonanzen eine überaus große, so daß deren Benennung durch die je drei Haupttöne des Geschlechtes, wie sie oben verzeichnet wurden, keine deutliche Kennzeichnung einer Disso-

nanz ermöglicht. So nimmt auch Riemann seine Zuflucht zu einem Gemisch von Grundakkorden und Stufenzählung in Generalbaß- und Generaldiskant-Art, ein Notbehelf, bei dem man immer in der temperierten Stimmung verharrt. In vollendeter Deutlichkeit wird immer nur die Buchstabentonschrift und ganz besonders übersichtlich auch die Notenreinschrift Akkorde zur Anschauung bringen, wozu nur noch die Symbolisierung hinzuzufügen wäre, um die funktionale Stellung der Akkorde innerhalb des Tonsystems sofort übersehen zu lassen.

Literatur. ***G. Zarlino,*** *Istitutioni harmoniche. Venezia 1558, 1562, 1573.* — ***Derselbe,*** *Dimostrazioni harmoniche, ibidem 1571.* — ***Derselbe,*** *Sopplimenti musicali. 1588.* — ***J. Ph. Rameau,*** *Traité de l'harmonie, réduite à ses principes naturels. Paris 1722.* — ***Derselbe,*** *Nouveau système de musique théorique, ibidem 1726.* — ***Derselbe,*** *Démonstration du principe de l'harmonie, ibidem 1750, 1752 und 1760.* — ***A. Werckmeister,*** *Musikalische Temperatur, 1691.* — ***Tartini,*** *Trattato di Musica, secondo la vera scienza dell' armonia. Padova 1754.* — ***Derselbe,*** *Dissertazione dei principi dell'armonia musicale, ibidem 1767.* — ***J. le Rond d'Alembert,*** *Eléments de musique théorique et pratique suivant les principes de Monsieur Rameau. Paris 1779.* — ***M. Hauptmann,*** *Die Natur der Harmonik und Metrik. Leipzig 1853 und 1873.* — ***H. Helmholtz,*** *Die Lehre von den Tonempfindungen. Braunschweig 1863, 5. Aufl. 1896.* — ***P. v. Janko,*** *Ueber mehr als zwölfstufige gleichschwebende Temperaturen. Stumpfs Beiträge zur Akustik und Musikwissenschaft, 1898.* — ***C. Stumpf,*** *Konsonanz und Dissonanz, ibidem 1898.* — ***A. v. Oettingen,*** *Harmoniesystem in dualer Entwickelung. Dorpat und Leipzig 1866.* — ***Derselbe,*** *Das duale Harmoniesystem. Leipzig 1913.* — ***H. Riemann,*** *Handbuch der Harmonielehre, 5. Aufl. Leipzig 1912.* — ***Derselbe,*** *Katechismus der musikalischen Akustik. Leipzig 1912.*

A. v. Oettingen.

Torf.

Siehe den Artikel „Kohlen".

Torrel

Otto Martin.

Er wurde am 5. Juni 1828 in Warberg in Schweden geboren. Seit 1844 studierte er in Lund Naturwissenschaften und Medizin, promovierte 1853 zum Dr. phil. und unternahm von 1856 an zahlreiche geologische Forschungsreisen, die ihn nach der Schweiz, nach Island, Spitzbergen und Grönland führten. 1866 wurde er Professor der Zoologie und Geologie an der Universität Lund. 1870 berief man ihn zum Leiter der geologischen Landesuntersuchung, der er bis 1897 vorstand. Er war 1872 Mitbegründer der schwedischen Geologischen Vereinigung. Am 11. September 1900 starb er in Charlottendal bei Stockholm.

Torrels Name ist für immer verknüpft mit der Inlandeistheorie. An den Gletschern Grönlands, Islands und Spitzbergens hatte er reiche Erfahrungen gesammelt. Auf einer Reise durch Norddeutschland erkannte er den glazialen Ursprung der diluvialen Ablagerungen; besonders die Untersuchungen der Gletschererscheinungen in Rüdersdorf bei Berlin ließen ihn die sogenannte Drifttheorie als falsch erkennen. In seinem denkwürdigen Vortrag am 3. November 1875 in der Deutschen Geologischen Gesellschaft stellte er die Inlandeistheorie auf, die, obwohl anfangs arg befeindet, heute als einzig in Betracht kommend die eiszeitlichen Bildungen in restloser Weise erklärt.

Literatur. ***Poggendorffs*** *Biographisch-literarisches Handwörterbuch, Bd. 3, II, S. 1359, Bd. 4, II, S. 1515.* — ***Gunnar Andersson,*** *Otto Torell †, Teknish Tidskrift, 1900.*

O. Marschall.

Torricelli

Evangelista.

Geboren am 15. Oktober 1608 in Modigliana in Toscana (oder Faenza in der Provinz Ravenna), gestorben am 25. Oktober 1647 in Florenz. Er kam 1628 nach Rom und studierte Mathematik bei Castelli, ging 1641 nach Arcetri zu dem erblindeten Galilei, um ihn bei der Ausarbeitung des Discorsi zu unterstützen, nach dessen Tode folgte er ihm in seinen Aemtern als Professor der Mathematik und Physik in Florenz. Torricelli griff Galileis Versuch auf, daß eine Wassersäule sich durch Saugpumpen nicht über 32 Fuß heben lasse, wiederholte in Gemeinschaft mit seinem Schüler Viviani diesen Versuch mit Quecksilber, und kam so 1643 zur Erfindung des Barometers, indem er als die Ursache des Aufsteigens der Flüssigkeit den Luftdruck erkannte, diesen maß, seine Schwankungen beobachtete und damit die Vorstellung von dem Horror vacui beseitigte. Der leere Raum über der Quecksilbersäule des Barometers wird die Torricellische Leere genannt. Seine Versuche über die Ausflußgeschwindigkeit von Flüssigkeiten führten ihn 1644 zur Aufstellung des als Torricellisches Theorem bekannten Gesetzes.

E. Drude.

Tourenzahlmesser.

1. Tourenzahlmessung durch Abzählen. 2. Summierende Tourenzähler. 3. Integrierende Tourenzähler. 4. Frequenzmesser. 5. Schlüpfungsmesser.

1. Tourenzahlmessung durch Abzählen. Die Technik versteht unter der Tourenzahl n einer Maschine oder einer Welle die Anzahl der Umdrehungen in einer Minute. Zur Messung dieser Zahl genügt unter Umständen das einfache Abzählen der Umdrehungen unter gleichzeitiger Beobachtung einer einfachen Taschenuhr oder Stoppuhr. Die einzelnen Umdrehungen lassen sich deutlich machen: für das Auge durch eine sichtbare Marke auf der Welle (z. B. Kreidestrich), für das Ohr durch ein bei jeder Wellenumdrehung auftretendes Geräusch, für den Tastsinn durch Anbringung einer fühlbaren Erhöhung auf der Welle. Bei hohen Tourenzahlen zählt man Tourengruppen, d. h. mehrere Marken auf eine Zahl. Bei sehr hohen Tourenzahlen kann man sich durch Benutzung einer endlosen Schnur helfen, die von der zu zählenden Welle angetrieben und durch eine Hilfsrolle in Spannung gehalten wird. Ein Knoten in der endlosen Schnur, welche man lose durch zwei Finger gleiten läßt, dient für den Tastsinn als Beobachtungsmarke. Ist l die Schnurlänge und d der wirksame Wellendurchmesser an der Schnurauflage, so ist $\frac{l}{d\pi}$ die Anzahl der Wellenumdrehungen zwischen zwei Knotendurchgängen. Gegebenenfalls kann also auch ein von der Welle ablaufender Riemen zur Auszählung benutzt werden und das Aufschlagen des Riemenschlosses als akustische Marke dienen.

2. Summierende Tourenzähler. Zur objektiven Messung von Tourenzahlen verwendet man besondere Tourenzähler und zwar summierende oder integrierende. Während die erstere Art die einzelnen Umdrehungen summiert und je eine Zeitbestimmung zu Beginn und Ende der Summation sowie eine anschließende Berechnung notwendig macht, integrieren die Zähler zweiter Art den Momentanwert der Umdrehungsgeschwindigkeit innerhalb der Grenzen $t = 0$ und $t = 1$ Minute und geben somit direkt die Tourenzahl an.

Als Summations-Tourenzähler kann man jedes beliebige Zählwerk benutzen, wenn es nur in irgend einer Weise mit der zu zählenden Welle gekuppelt werden kann. Gewöhnlich endet die Antriebswelle des Zählwerkes in eine dreikantige Spitze, welche bei der Benutzung des Zählwerkes in den Körner der zu messenden Welle eingedrückt wird und die Wellendrehung auf das Zählwerk überträgt.

Eine verbreitete Zählwerk-Anordnung ist folgende. Man setzt mit einem von der zu zählenden Welle angetriebenen Trieb T (Fig. 1) zwei Zahnräder A und B mit den Zähnezahlen z und $z + 1$ in Eingriff. Das ist bei größeren Werten von z mit Rücksicht auf die immer vorhandene Zahnluft gut durchführbar. Hat das Trieb T a Zähne, so macht Rad A $\frac{a}{z}$, Rad B $\frac{a}{z+1}$ Umdrehungen auf eine Triebumdrehung. Die relative Drehung beider Räder zueinander ist dann $\frac{a}{z} - \frac{a}{z+1} = \frac{a}{z(z+1)}$. Versieht man A mit einer Kreisteilung, B mit einem auf letzterer laufenden Zeiger Z, so durchläuft dieser die ganze Kreisteilung nach $\frac{z(z+1)}{a}$ Umdrehungen des Triebes T bezw. der zu messenden Welle. Für $a = 20$ und $z = 100$ Zähne erfolgt z. B. eine volle Zeigerumdrehung in $\frac{100 \cdot 101}{20} = 505$ Umdrehungen. Dieses für manche Zählungen geringe Zählbereich kann sofort stark vergrößert werden, wenn man den Stirnradeingriff in Figur 1 durch einen Schneckenradeingriff (Fig. 2) ersetzt. Dann wirkt die Schnecke wie ein einzahniges Trieb. Sind die Zähnezahlen von A und B auch hier wieder 100 und 101, so entspricht eine volle Umdrehung des Zeigers z_1 relativ zur Teilung auf A $\frac{10100}{1}$ Umdrehungen. Bringt man außer dem Zeiger Z_1 für die Kreisteilung auf A noch eine zweite Kreisteilung in 100 Teilen an, so gestattet der Zeiger Z_2 noch, die Umdrehungen 1 bis 100 abzulesen.

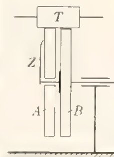


Fig. 1.

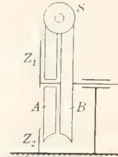


Fig. 2.

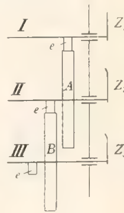


Fig. 3.

Für noch größere Zählbereiche dienen Zählwerke mit sogenannter Einzahnübertragung. Ist die zu zählende Welle mit der Achse I in Figur 3 gekuppelt und greift der eine Zahn l in ein Zahnrad A mit 10 Zähnen, so wird sich die Achse II nach jeder Umdrehung von I um $\frac{1}{10}$ Umgang drehen, Achse III bei gleicher Anordnung des Ein-

griffes um $\frac{1}{100}$ Umgang. Laufen die Zeiger Z_1, Z_2, Z_3 je auf einer Zehnerteilung, so ergibt ihre Ablesung Einer, Zehner und Hunderter Umdrehungen. Durch Angliederung weiterer Einzahneingriffe läßt sich somit das Zählbereich wesentlich erweitern. Die technische Anordnung des Einzahneingriffes (sogenannte Zehnerübertragung) zeigt Figur 4. Die Lücken des

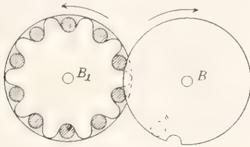


Fig. 4.

10zähnigen Rades B_1 tragen aufrechtstehende Stifte, von denen immer zwei benachbarte an der Peripherie der Scheibe B anliegen. B_1 kann somit die Drehung von B nur dann aufnehmen, wenn der auf der Unterseite von B angebrachte Triebstift s auf einen Zahn von B_1 auftrifft. Die neben s befindliche Lücke erlaubt dann immer nur einem Stift auf B_1 den Durchgang durch die Zentrale. Vor und nach diesem Durchgang bleibt also B_1 sicher blockiert. — Zählwerk und Uhr können in einem Apparat vereinigt sein und die Vorrichtung zu gemeinsamer Auslösung und Arretierung tragen. Haftet dieser Art der Tourenzahlbestimmung mit Zählwerk und Uhr auch eine gewisse Umständlichkeit an, so ist die Methode doch namentlich dann unentbehrlich, wenn es sich darum handelt, die mittlere Tourenzahl einer Maschine zu bestimmen.

3. Integrierende Tourenzähler. Die integrierenden Tourenzähler machen die Verwendung einer Stoppuhr überflüssig; die Möglichkeit, an ihnen die Tourenzahlen direkt abzulesen und auch Aenderungen derselben in kleinen Zeiträumen festzustellen, werden an diesen „Tachometern" besonders geschätzt.

Eine große Zahl Tachometerkonstruktionen beruhen auf der Zentrifugalwirkung rotierender Massen. Als Indikatormassen verwendet man in den Zentrifugaltachometern feste oder flüssige Körper. Die Fliehkraft steht dabei in Wechselwirkung mit der Schwerkraft oder mit einer Federkraft. Am häufigsten wird das Zentrifugalpendel als Indikator verwendet; Figur 5 zeigt ein solches Pendel mit Schwerkraftwirkung, Figur 6 mit Federkraft. Bei der ersten Anordnung ist die genaue Vertikalstellung der Drehachse von Wichtigkeit; die zweite Anordnung ist in der Stellung unabhängig, kann aber infolge von Nachwirkungserscheinungen in der Meßfeder fehlerhaft wirken. Figur 7 zeigt die schematische Anordnung eines Tachometers der ersten Art (System Carlier). Die Pendelkugeln schwingen um a; werden sie nach außen bewegt, so sinkt der tellerartige Körper, der an der Rotation nicht teilnimmt, herab und dreht die den Zeiger tragende Triebachse T durch Vermittlung einer an der Tellermuffe befestigten Zahnstange. Das Schema eines Tachometers zweiter Art ist in Figur 8 dargestellt (Fliehpendeltachometer Schaeffer und Budenberg). Der durch irgendeine Federanordnung gehemmte Fliehkörper P stellt sich je nach der Tourenzahl unter einen bestimmten Winkel zur Rotationsachse ein. Seine Drehung überträgt er mittels Arm A und verschiebbarer Muffe M auf das Zeigerwerk Z.

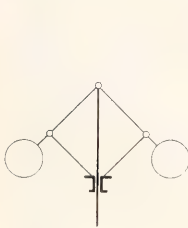


Fig. 5.

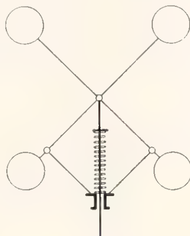


Fig. 6.

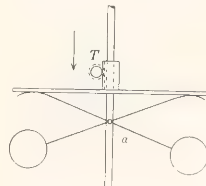


Fig. 7.

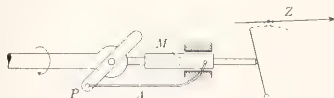


Fig. 8.

Die einfachsten Zentrifugaltachometer mit flüssigem Indikator hat O. Braun in Berlin angegeben. Diese sogenannten Gyrometer bestehen gemäß Figur 9 aus einem zylindrischen, vollständig geschlossenen Glasrohr, das teilweise mit Glycerin gefüllt ist. Wird das Rohr von der zu messenden Welle synchron in Umdrehung versetzt, so bildet die Oberfläche der Füllung ein Rotationsparaboloid, dessen Scheiteltiefe von der Tourenzahl abhängt und an einer nach Tourenzahlen abgestuften Teilung auf dem Glasrohr abgelesen werden kann. Die Konstruktion eignet sich besonders für sehr hohe Tourenzahlen und findet namentlich auf Zentrifugen Verwendung. Für niedrige Tourenzahlen werden die Gyrometer in liegender Stellung, mit einer geringen Neigung zur Horizontalen, gebaut. — Auf verwandtem Prinzip beruhen die Bifluidtachometer der Rheinischen Tachometerwerke. Das in Figur 10 skizzierte Glasgefäß, welches mit der Maschine rotiert, enthält in seinem unteren Teil etwas Quecksilber Q, darüber gefärbten Alkohol. Durch die Fliehkraft wird das Quecksilber in die seitlichen Kanäle getrieben und hebt das Alkoholniveau in dem engen Mittelrohr. Die Hubhöhe gibt die Tourenzahl.

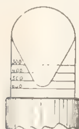


Fig. 9.

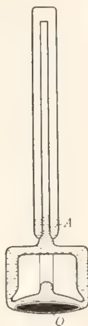


Fig. 10.

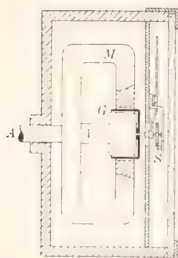


Fig. 11.

Statt der Fliehkraft sind noch andere physikalische Erscheinungen zur Tourenzahlmessung herangezogen worden. So stellt Figur 11 das Prinzip eines Wirbelstromtachometers dar. Die mit der zu messenden Maschine rotierende Welle A trägt einen permanenten Magneten M, dessen interpolarer Raum durch einen mit A konachsialen Eisenanker als schmaler ringförmiger Spalt ausgestaltet ist, der somit ein ziemlich homogenes Magnetfeld bildet. In dem Spalt ist leicht drehbar und im Kraftschluß mit einer Spiralfeder S eine Kupferglocke G gelagert. Rotiert der Magnet, so werden in G Wirbelströme erzeugt, welche die Glocke je nach der Tourenzahl aus ihrer Ruhelage drehen. Mittels eines an der Glockenachse befestigten Zeigers kann die Tourenzahl an einer empirischen Skala abgelesen werden. — Auf dem Prinzip der Resonanz hat Frahm sein Tachometer aufgebaut. Auf einem Gestell sind eine Anzahl Stahllamellen federnd befestigt (Fig. 12). Die Lamellen sind so abgestimmt, daß ihre Schwingungszahlen eine arithmetische Reihe bilden, also z. B. von Feder zu Feder stetig um 5 Schwingungen zunehmen. Setzt man einen solchen „Frahmschen Kamm" auf eine rotierende Maschine, so wird durch die bei der Rotation der Maschine im Tempo der Umdrehungen auftretenden Stöße diejenige Lamelle zur stärksten Schwingung angeregt, deren Schwingungszahl mit der Tourenzahl der Maschine übereinstimmt. Da gleichzeitig, wenn auch schwächer, auch diejenigen Lamellen, deren Schwingungszahlen ein ganzes Vielfaches der Tourenzahl sind, resonieren, so ist eine angenäherte Kenntnis der zu bestimmenden Tourenzahl erforderlich. Will man das Resonanztachometer zu Fernablesungen verwenden, so läßt man auf einem am Kammgestell befestigten Anker einen Elektromagnet E wirken, der bei jeder Umdrehung der Maschine erregt wird (s. Fig. 12).

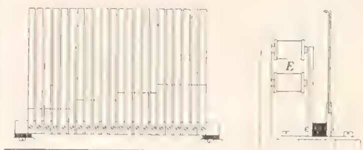


Fig. 12.

Für wissenschaftliche Tourenzahlmessungen höchster Genauigkeit können noch andere Meßmethoden in Frage kommen. So kann man mit der zu zählenden Achse eine Schraube ohne Ende verbinden, welche ein Schneckenrad mit bekannter Zähnezahl antreibt. Das letztere schließt bei jeder vollen Umdrehung einmal einen kurzen Kontakt, durch den ein Stromstoß auf den einen Schreibhebel eines Streifen- oder Trommel-Chronographen übertragen wird. Neben diesem Hebel markiert ein zweiter die Sekundenschläge einer Normaluhr. Für

kurze Messungen kann man sich ferner einer schreibenden Stimmgabel bedienen, welche ihre Schwingungen auf eine mit der Maschine rotierende berußte Trommel oder Scheibe schreibt. Da die Schwingungszahl der Stimmgabel genau ermittelt werden kann, lassen sich aus den von ihr aufgeschriebenen sinusartigen Wellen ohne Uhr sehr genaue Momentanwerte der Umdrehungszahl feststellen. Auch stroboskopische Methoden haben für die Tourenzahlmessung ausgedehnte Verwendung gefunden.

4. **Frequenzmesser.** In engem Zusammenhang mit der Tourenzählung steht die Bestimmung der Wechselzahl bezw. Frequenz von Wechselstrommaschinen. Beruht doch die einfachste Form der Frequenzmessung auf der Feststellung der sekundlichen Umdrehungszahl $\frac{n}{60}$ und der Wechselpolzahl 2 p der Dynamo; dann gibt $z = 2\,p\,\frac{n}{60}$ die Wechselzahl, $u = \frac{p.n}{60}$ die Frequenz.

Für spezielle Frequenzmesser sind vor allem diejenigen Tourenzählmethoden geeignet, welche auf der elektrischen Erregung mechanischer Resonanz beruhen. So hat Stöckhardt eine elektrisch erregte Stimmgabel benutzt, deren Schwingungszahl durch Verschiebung von Gabelgewichten meßbar geändert werden kann. Sendet man durch die zwischen die Gabelzinken eingebaute Erregerspule den zu zählenden Wechselstrom, so erhält die Stimmgabel bei geeigneter Stellung der Gabelgewichte ein Schwingungsmaximum, wenn die Wechselzahl gleich der Gabelschwingungszahl oder ein ganzes Vielfaches derselben ist. Um grobe Fehler bei dieser Anordnung zu vermeiden, muß man die Wechselzahl annähernd bereits kennen. Sicherer arbeitet der Wechselzeiger von Hartmann u. Braun. Dieser benutzt einen Satz abgestufter Stahlzungen, welche als Anker vor einer Wechselstromspule schwingen. Die Zungen sind mit ihrer Schwingungszahl bezeichnet; die Schwingungszahl der am stärksten schwingenden Zunge stimmt mit der Wechselzahl überein.

5. **Schlüpfungsmesser.** Gleichfalls auf dem Prinzip der Tourenzählung beruhen die Schlüpfungsmessungen bei Asynchronmotoren. Hat das in dem ringförmigen, feststehenden Ständer kreisende Drehfeld eine sekundliche Umdrehungszahl n_1, der Läufer bezw. n_2, dann nennt man $n_1 - n_2$ die Schlüpfung des Motors. Da die direkte Tourenzählung hierbei minder genaue Resultate gibt, weil die Schlüpfung in der Regel nur wenige Prozent der primären Tourenzahl ausmacht, so wendet man andere Spezialmethoden an. So läßt sich der Wechselzeiger von Hartmann und Braun verwenden, wenn man zu beiden Seiten der Stahlzungenreihe je einen verschiebbaren Wechselstrommagneten anordnet. Der eine Magnet ist nach Voltmeterart an die Ständerwickelung angeschlossen, der andere an einen Gleichstromkreis, welcher von einer besonders gebauten, auf der Läuferachse befestigten Kommutatortrommel abgenommen wird. Die Wechselzahl sowie die Zahl der Gleichstromimpulse wird dann durch Resonanz der Stahlzungen festgestellt. Zum gleichen Zweck der Schlüpfungsmessung hat Benischke eine stroboskopische, Kühns eine auf optischen Schwebungen einer Glühlampe beruhende Anordnung ausgearbeitet.

Literatur. **A. Gramberg**, *Technische Messungen bei Maschinenuntersuchungen und im Betriebe, 2. Aufl. Berlin 1910. — Handbuch der Elektrotechnik, herausgegeben von* **C. Heinke**, **II** *Bd., IV. Abt. Leipzig 1908. —* **J.-G. Carlier**, *Methodes et appareils de mesure du temps, des distances, des vitesses et des accelerations, 2 Bde. Paris 1905.*

F. Göpel.

Tournefort

Joseph Pitton de.

Geboren am 5. Juni 1656 in Aix en Provence. Ursprünglich dem geistlichen Stande bestimmt, widmete er sich frühzeitig den Naturwissenschaften, besonders der Botanik, die ihn zu zahlreichen Reisen veranlaßte. Von 1679 bis 1681 studierte er in Montpellier, bereiste darauf Catalonien und wurde 1683 als Professor an den Jardin du Roi nach Paris berufen, wo er zahlreiche Schüler um sich versammelte. 1688 begab er sich wieder auf Reisen und besuchte Spanien, Portugal, England und Holland. 1691 wurde er Mitglied der Akademie der Wissenschaften, auf deren Vorschlag ihn Ludwig XIV. bald darauf mit einer Reise nach der Levante beauftragte. 1700 brach er auf, besuchte Kreta, die ägäischen Inseln, Kleinasien, Armenien und Georgien und kehrte mit reichen Sammlungen nach 2 Jahren nach Paris zurück. Dort wurde er bald darauf zum Professor der Medizin am Collège de France ernannt und starb ebendort am 28. November 1708 an den Folgen eines Unfalles. — Das von ihm aufgestellte Pflanzensystem ist lange herrschend gewesen, obwohl es noch ganz künstlich war und sich wie das von Rivinus auf die äußere Form der Blumenkrone gründete. Einen Fortschritt stellen seine Diagnosen der Gattungen dar, während er die Arten vernachlässigte. Die zugrunde liegenden Anschauungen vom Bau und Bedeutung der Blüten- und Fruchtteile bedeuten gegenüber seinen Vorgängern und Zeitgenossen einen erheblichen Rückschritt. Dagegen vermehrte er die Zahl der damals bekannten Pflanzen sehr erheblich und gab treffliche Abbildungen von ihnen. Genannt seien die „Eléments de botanique“ (Paris 1694,

3 Bände), die „Rélations d'un voyage du Levant" (Paris 1717, 2 Bände) und die „Institutiones rei herbariae" (2. Auflage, ebendort 1708, 3 Bände).

W. Ruhland.

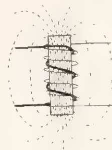
Transformatoren.

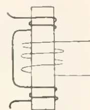
1. Einleitung. Physikalische Grundlagen. a) Induktionsgesetz. b) Magnetischer Kreis. c) Hysteresisarbeit und Wirbelströme. 2. Wechselstromtransformator. a) Theorie. α) Idealer streuungs- und widerstandsloser Transformator. β) Einfluß von Streuung und Ohmschen Widerstand. γ) Energieverluste, Wirkungsgrad, Erwärmung. b) Starkstromtransformatoren. α) Allgemeines. β) Spezialausführungen. c) Meßtransformatoren. d) Induktoren und Resonanzinduktoren. e) Telephontransformatoren. 3. Induktor mit Gleichstrombetrieb. a) Induktionsapparat. b) Funkeninduktor. α) Allgemeines. β) Theorie, Leerlauf. γ) Theorie, Belastung. δ) Energieverhältnisse. ε) Aufbau von Funkeninduktoren. c) Unterbrecher. α) Mechanische Unterbrecher. β) Elektrolytische Unterbrecher. γ) Unterbrecher für Wechselstrom. d) Spezialanordnungen.

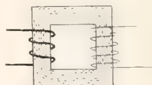
1. Einleitung. Physikalische Grundlagen. Mit dem Namen „Transformatoren" (auch „Wandler") bezeichnet man Apparate, welche durch Induktionswirkung einen gegebenen periodisch veränderlichen Strom (Wechselstrom) in einen ebensolchen von höherer oder tieferer Spannung verwandeln und diesen Zweck ohne bewegte (rotierende) Teile erreichen. Der heutige Sprachgebrauch unterscheidet scharf zwischen Transformatoren und „Umformern"; der letztere Name wird ausschließlich für rotierende Apparate (Motordynamos, Einankerumformer, vgl. den Artikel „Dynamomaschinen"), wie sie vorzugsweise zur Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom und umgekehrt verwendet werden, gebraucht.

Ein Transformator besteht im wesentlichen aus zwei voneinander isolierten Spulen, der Primär- und der Sekundärspule, die auf einem gemeinsamen Eisenkerne sitzen. Von den Spulen befindet sich gewöhnlich die eine innerhalb der anderen, wie es schematisch Fig. 1a zeigt, doch werden die Spulen bisweilen auch nebeneinander angeordnet, wie in Fig. 1b, wo die Sekundärspule sich zwischen den beiden Hälften der unterteilten Primärspule befindet. Der Eisenkern hat entweder die Form eines geraden Zylinders, wie in Figur 1a und 1b (offener magnetischer Kreis), oder eines geschlossenen Ringes oder Rechteckes (geschlossener magnetischer Kreis, Fig. 1c).

1 a) Induktionsgesetz. Fließt in der einen der beiden Spulen einer solchen Anordnung (in der Primärspule) ein zeitlich veränderlicher Strom, so wird in der anderen (der Sekundärspule) eine elektromotorische Kraft (EMK.) induziert. Diese EMK. kommt dadurch zustande, daß der Primärstrom ein Magnetfeld erzeugt, dessen Feldlinien (Kraft-


Fig. 1a.


Fig. 1b.


Fig. 1c.

oder Induktionslinien), vom Eisenkern geleitet, die Sekundärspule durchsetzen; die Aenderung dieses Magnetfeldes ist es, die nach dem Faradayschen Induktionsgesetz (vgl. den Artikel „Magnetfeldwirkungen") die sekundäre EMK. hervorruft. Dieses Gesetz sagt aus, daß die in einem Leiter induzierte EMK. E gleich der pro Sekunde erfolgenden Abnahme der gesamten, von dem Leiter umschlungenen Feldlinienzahl, des sogenannten magnetischen Flusses Φ' ist:

$$E = -\frac{d\Phi'}{dt} \text{ absol. Einh. (C. G. S.)}$$

$$(1) \qquad = -\frac{d\Phi'}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Ist, wie in unserem Fall, der Leiter eine Spule mit Eisenkern, deren N Windungen alle die gleiche Feldlinienzahl, nämlich den durch das Eisen tretenden Fluß Φ, umschlingen, so wird $\Phi' = N \cdot \Phi$ und damit

$$(1a) \qquad E = -N \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Ist die Spule mit einem Leiter von konstantem Widerstande zu einem geschlossenen Stromkreise verbunden, so wird von der EMK. E durch diesen Kreis in einer bestimmten Zeit eine Elektrizitätsmenge bewegt, die proportional ist der in dieser Zeit erfolgen Aenderung $\Phi_2 - \Phi_1$ des Flusses Φ. Aendert sich, wie stets beim Transformator, Φ periodisch, so ist nach einer ganzen Zahl von Perioden die Aenderung gleich null; durch Induktion kann also nicht dauernd Elektrizität in einer Richtung bewegt werden; der induzierte Strom kann keine Gleichstromkomponente enthalten, er ist ein „reiner" Wechselstrom.

1 b) Magnetischer Kreis. Das Magnetfeld, das hiernach für die Wirkung des Transformators wesentlich ist, wird zunächst durch den in der Primärspule fließenden Strom erzeugt. Für die Erzeugung eines Magnetfeldes durch eine Spule gilt das Gesetz:

$$\Phi = \frac{0{,}4\,\pi N J}{W_m}; \qquad (2)$$

das heißt, die durch die Spule hindurchtretende Zahl von Feldlinien, der Induktionsfluß Φ, ist proportional der Zahl ihrer „Amperewindungen“, d. h. dem Produkte aus Stromstärke J und Windungszahl N; sind mehrere Spulen vorhanden, so ist die Summe ihrer Amperewindungen maßgebend. Ferner ist Φ umgekehrt proportional dem „magnetischen Widerstande“ W_m des Feldlinienweges. Dieser Widerstand berechnet sich in ähnlicher Weise wie der elektrische Widerstand eines Leiters aus den Dimensionen des von dem Induktionslinienbündel eingenommenen Raumes, des „magnetischen Kreises“: er ist proportional seiner Länge (längs der Feldlinien gemessen) und umgekehrt proportional seinem Querschnitt (senkrecht dazu gemessen); außerdem ist er umgekehrt proportional der magnetischen Leitfähigkeit oder Permeabilität μ des Mediums, in dem die Feldlinien verlaufen. Für Luft ist die Permeabilität $\mu = 1$, für Eisen ist sie bis 3000 mal so groß, darauf beruht der ungeheure Vorteil der Verwendung von Eisen. Voll ausgenützt wird dieser Vorteil nur, wenn den Feldlinien durch einen geschlossenen Eisenkreis, wie in Fig. 1c, Gelegenheit gegeben ist, auf ihrem ganzen Wege in Eisen zu verlaufen. Bei offenem magnetischen Kreis (Fig. 1a), wo die Feldlinien einen Teil ihres Weges durch die Luft zurücklegen, ist der in Betracht kommende Widerstand gleich der Summe der Widerstände von Eisenweg und Luftweg, also annähernd gleich dem Widerstande des Luftweges, da der Eisenwiderstand hier vernachlässigbar klein ist. Trotzdem wird durch die Einfügung des Eisenkernes nach Fig. 1a der gesamte magnetische Widerstand ganz erheblich (10—100 mal) verringert, weil ohne Eisen der weitaus größte Teil des Widerstandes im Innern der Spule, wo das Feldlinienbündel einen viel kleineren Querschnitt als im Außenraum hat, seinen Sitz hat. Noch weiter verringern läßt sich der magnetische Widerstand, wenn man dem Induktionslinienbündel bei seinem Austritt in die Luft gleich einen möglichst großen Querschnitt gibt, indem man die Bleche oder Drähte, aus denen der Eisenkern stets aufgebaut ist, an den Enden auseinanderbiegt (Swinburnescher Igeltransformator, Fig. 2). Auch dann ist aber der magnetische Widerstand immer noch mindestens 10mal so groß wie bei geschlossenem Eisenkreis.

Für Luft ist μ eine Konstante; der magnetische Widerstand ist daher bei offenem magnetischen Kreis, wo er, wie oben erläutert, seinen Sitz hauptsächlich in der Luft hat, konstant, und der Induktionsfluß Φ wirklich proportional zu der Amperewindungszahl NJ. In diesem Falle lassen sich die beiden Grundgleichungen (1a) und (2) zusammenfassen, indem man für Φ seinen Wert aus Gleichung (2) in (1a) einsetzt: Ist die Windungszahl der Spule, in der die induzierte EMK. E_2 auftritt, gleich N_2, die der Spule, in welcher der das Magnetfeld erzeugende Strom J fließt, gleich N_1, so wird

$$E_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} = -\frac{4\pi N_1 N_2}{W_m} \cdot 10^{-9} \frac{dJ}{dt}$$

$$= -M \frac{dJ}{dt}; \qquad (3)$$

die induzierte EMK. wird also proportional der Aenderungsgeschwindigkeit $\frac{dJ}{dt}$ des Stromes; M heißt der gegenseitige Induktionskoeffizient der beiden Spulen, er hat den gleichen Betrag, wenn induzierte und induzierende Spule ihre Rollen vertauschen Auch in der Spule, in der der induzierende Strom fließt, tritt eine ihrer Windungszahl N_1 entsprechende EMK. auf:

$$E_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} = -\frac{4\pi N_1^2}{W_m} \cdot 10^{-9} \frac{dJ}{dt}$$

$$= -L_1 \frac{dJ}{dt}. \qquad (3a)$$

Der Proportionalitätsfaktor L_1 ist der „Selbstinduktionskoeffizient“ der Spule. Näheres hierüber findet man im Artikel „Magnetfeldwirkungen“.

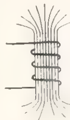


Fig. 2.

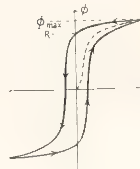


Fig. 3.

Beim Eisen ist aber μ nicht konstant, sondern von Φ abhängig; daher ist bei geschlossenem Eisenkreis Φ in Wirklichkeit nicht proportional zu NJ; der Zusammenhang von Φ und NJ wird in diesem Fall dargestellt durch eine „magnetische Charakteristik“ oder „Hysteresiskurve“ (Fig. 3), welche zwei für uns wichtige Eigentümlichkeiten aufweist: 1. Bei zunehmendem Strom sind die zu gleichem NJ gehörenden Beträge von Φ kleiner als bei abnehmendem Strom (Hysteresis); insbe-

sondere nimmt Φ, wenn NJ von seinem Maximalwerte bis auf null abnimmt, nicht bis auf null ab, sondern nur auf den vom Maximum Φ_{max} wenig verschiedenen Wert R (Remanenz). Wenn also J seine Richtung nicht wechselt (z. B. bei unterbrochenem Gleichstrom), so ist die in einer Sekundärspule induzierte EMK., die von der Aenderung von Φ abhängt, nur gering: in solchem Falle ist daher ein Transformator mit geschlossenem Eisenkreis unbrauchbar. 2. Auch wenn man von der Hysteresis abstrahiert, indem man eine zwischen den beiden Aesten liegende mittlere Kurve (punktiert in Fig. 3) als Magnetisierungskurve ansieht, ist zwar bei kleinem NJ Proportionalität zwischen Φ und NJ vorhanden, bei größerem NJ nimmt aber Φ **sehr viel langsamer als NJ zu („Sättigung"); man vermeidet deshalb in der Praxis Werte** von Φ, die erheblich oberhalb des „Knies" der Magnetisierungskurve liegen, weil diese einen unverhältnismäßig großen Magnetisierungsstrom erfordern, und beschränkt sich auf Induktionsliniendichten von höchstens 10000 bis 15000 Linien pro qcm.

1c) Hysteresisarbeit und Wirbelströme. Während ein zeitlich veränderliches Magnetfeld in Luft ohne Energieverlust erzeugt werden kann (die im Felde aufgespeicherte magnetische Energie strömt beim Verschwinden des Feldes wieder vollständig in die Magnetisierungsspule zurück), tritt bei der Ummagnetisierung von Eisen eine Wär**meentwickelung, verbunden mit einem** entsprechenden Energieverlust auf. Dieser **Verlust besteht aus zwei Anteilen: ein Teil** hängt mit der Hysteresis zusammen, sein Betrag ist bei einer vollständigen Ummagnetisierung gleich dem Flächeninhalt der Hysteresisschleife, pro sec. also gleich dieser Fläche, multipliziert mit der Periodenzahl. Er wächst mit der Amplitude der Magnetisierung (etwa mit der 1,6. Potenz des Maximalwertes von Φ) und hängt sehr stark von der Zusammensetzung der betr. **Eisensorte ab. Ganz reines Eisen (Elektrolyteisen) hat den geringsten Hystereseverlust. Der zweite Teil des Energieverlustes rührt von der elektrischen Leit**fähigkeit des Eisens her. Denn diese gibt **wegen der elektromotorischen Kräfte, die ebenso wie in der Sekundärspule, so auch im Eisen induziert werden, Veranlassung zur Ausbildung von Strömen, den sogenannten Foucault- oder Wirbelströmen, welche Joulesche Wärme entwickeln und somit Energie verbrauchen**[1]**. Um diese** Verluste nach Möglichkeit zu verkleinern, unterbricht man den Weg für die Wirbelströme, indem man das Eisen längs der Induktionslinien unterteilt; die Eisenkerne werden zu diesem Zwecke stets aus Blechen, bei kleinen Transformatoren auch aus Drähten, aufgebaut, die voneinander durch Seidenpapier oder durch Lack isoliert sind. Die noch übrig bleibenden Verluste sind proportional dem Quadrate der Blechdicke, dem Quadrate der Frequenz und dem Quadrate der Amplitude der Induktionsliniendichte, und umgekehrt proportional dem spezifischen Widerstande der betreffenden Eisensorte. Bei den in der Technik verwendeten Blechdicken (0,3 bis 0,5 mm) sind die „Wirbelstromverluste" von gleicher Größenordnung wie die „Hysteresisverluste". **Weitere Herabsetzung der Blechdicke ist bei den üblichen Frequenzen ungünstig,** weil dann die isolierende Papierzwischenlage und die Oxydschicht („Zunderschicht") auf den Blechen im Vergleich zum wirksamen Eisen zuviel Raum einnehmen. Dagegen lassen sich die Wirbelstromverluste erheblich verringern durch Verwendung eines Eisens von hohem spezifischen elektrischen Widerstande: besonders geeignet sind Eisen-Siliziumlegierungen, welche zugleich auch besonders geringen Hystereseverlust aufweisen: der Gesamtverlust beträgt bei solchen „legierten" Blechen, die heute im Transformatorenbau fast ausschließlich verwendet werden, nur etwa 1/3 bis 1/2 des**jenigen von normalem Blech. Näheres** hierüber findet man im Artikel „Magnetische Eigenschaften der Stoffe".

Um die Güte eines Eisens in bezug auf die Energieverluste zu kennzeichnen, gibt man in der Technik die „Verlustziffer" an, d. h. die Gesamtverluste in Watt, welche bei der Ummagnetisierung von 1 kg der betreffenden Eisensorte bei 50 Perioden pro sec. auftreten, und zwar unterscheidet man die „kleine Verlustziffer" V_{10}, welche sich auf eine Magnetisierungsamplitude von **10000 Linien pro qcm bezieht und die „große Verlustziffer" V_{15}, welche einer maximalen Induktionsliniendichte von 15000 Linien pro qcm entspricht. Die folgende** Tabelle gibt einige Durchschnittswerte der **Verlustziffer:**

Material und Blechdicke	V_{10}	V_{15}
Normales Blech 0,5 mm	3,3	7
Normales Blech 0,35 mm	2,6	6,7
Legiertes Blech 1% Si 0,5 mm	2,0	6,8
Legiertes Blech 4% Si 0,35 mm	1,36	3,2

2. Wechselstromtransformator. 2a) Theorie. α) Idealer streuungs- und widerstandsloser Transformator. Die technischen Wechselstromtransformatoren werden

[1]) Sie wirken außerdem noch entmagnetisierend; bei den gebräuchlichen Transformatoren mit unterteiltem Eisenkern ist aber diese Wirkung bei normalen Frequenzen unmerklich klein.

stets in der Weise gebraucht, daß ihre Primärseite an einen Wechselstromgenerator oder ein Wechselstromnetz von konstanter[1]) Spannung angeschlossen wird. Sie haben fast stets geschlossenen magnetischen Kreis (Schema Fig. 1c), die magnetischen Induktionslinien verlaufen daher fast ausschließlich im Eisen. Um die Wirkungsweise zu verstehen, wollen wir deshalb vorläufig die vereinfachende Annahme machen, daß das Magnetfeld nur im Eisen vorhanden ist, daß also durch Primärspule und Sekundärspule genau der gleiche magnetische Fluß Φ tritt (streuungsloser Transformator). Ferner wollen wir, da der in den Spulen wegen ihres Widerstandes r auftretende Spannungsabfall $J \cdot r$ stets sehr klein gegenüber den induzierten EMKK. ist, die Spulenwiderstände zunächst ganz vernachlässigen. Dann sind die einzigen in den Spulen auftretenden Spannungen die induzierten EMKK. Auf der Primärseite (Windungszahl N_1) muß die induzierte EMK. der Netzspannung e_1 das Gleichgewicht halten, ihr also entgegengesetzt gleich sein:

$$(4a) \quad e_1 = -\left(-N_1 \frac{d\Phi}{dt}\right) = +N_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

während die Sekundärspannung e_2 direkt gleich der in der Sekundärspule (Windungszahl N_2) induzierten EMK. ist:

$$(4b) \quad e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

woraus durch Division folgt:

$$(5) \quad \frac{e_2}{e_1} = -\frac{N_2}{N_1} = -U,$$

d. h. die Sekundärspannung ist, ganz gleichgültig nach welchem Zeitgesetze sie verläuft, in jedem Augenblick der Primärspannung entgegengerichtet und ihr proportional; der Proportionalitätsfaktor U ist gleich dem Verhältnis der Windungszahlen und heißt Uebersetzungsverhältnis. Dieser Satz gilt unabhängig davon, ob durch die Sekundärspule ein Strom fließt oder nicht, ob sie also durch einen Stromverbraucher geschlossen oder offen ist; daher ist unter der gemachten Voraussetzung die Sekundärspannung unabhängig von der entnommenen Stromstärke, falls es die Primärspannung ist.

Gleichung (4a) zeigt, daß zwischen der Primärspannung und der Größe des Induktionsflusses Φ ein eindeutiger Zusammenhang besteht. Bei „konstanter" Primärspannung muß also auch Φ konstant sein, ganz unabhängig davon, ob der Transformator sekundär belastet ist oder nicht. Das liefert ein Mittel zur Berechnung der Ströme; es muß nämlich der Primärstrom stets automatisch einen solchen Betrag annehmen, daß gerade die zur Erzeugung dieses Flusses erforderliche Amperewindungszahl vorhanden ist. Ist die Sekundärspule offen, also der Sekundärstrom $J_2 = 0$, so werden diese Amperewindungen allein vom Primärstrom geliefert, der dann Leerlaufstrom (J_0) heißt; seine Amperewindungen $N_1 J_0$ müssen also in jedem Augenblicke mit dem nach Gl. (4a) benötigten Flusse Φ in dem durch die magnetische Charakteristik Figur 3 gegebenen Zusammenhange stehen.

Genau die gleiche Amperewindungszahl $N_1 J_0$ ist nun beim „belasteten" Transformator, d. h. wenn an die Sekundärwickelung ein den Strom J_2 verbrauchender Apparat angeschlossen ist, erforderlich. Es muß also dann die gesamte Amperewindungszahl

$$N_1 J_1 + N_2 J_2 = N_1 J_0$$

oder

$$(6) \quad N_1 (J_1 - J_0) = N_1 J_1' = -N_2 J_2$$

sein; d. h. wenn durch die Sekundärspule ein Strom J_2 fließt, so vergrößert sich automatisch der Primärstrom um einen Betrag

$$J_1' = -\frac{N_2}{N_1} J_2 = -U J_2,$$

der dem Sekundärstrom entgegengesetzt gerichtet ist und dessen magnetische Wirkung gerade kompensiert.

Da bei technischen Transformatoren der Leerlaufstrom J_0 stets klein gegenüber dem normalen Belastungsstrom ist, so ist annähernd $J_1 = J_1'$, also gilt in jedem Moment:

$$(7) \quad \frac{J_2}{J_1} = -\frac{N_1}{N_2} = -\frac{1}{U},$$

d. h. der Primärstrom ist in jedem Augenblick dem Sekundärstrom entgegengerichtet und ihm proportional; der Proportionalitätsfaktor ist wieder gleich dem Uebersetzungsverhältnis.

Die bisherigen Betrachtungen, insbesondere Gleichung (5) und (7) gelten unabhängig von dem Zeitgesetz des Wechselstromes oder der Spannung, also für Ströme und Spannungen beliebiger Kurvenform (wichtig für Meßtransformatoren, s. unten). Von jetzt ab wollen wir uns aber auf den praktisch wichtigsten Fall beschränken, daß Spannungen und Ströme (abgesehen vom Leerlaufstrom) sinusartig verlaufen. Dann folgt aus den für die Momentanwerte geltenden Gleichungen (5) und (7) für die Effektivwerte und Phasen: das Verhältnis der Sekundärspannung zur Primärspannung, so-

[1]) „Konstant" bedeutet hier und im folgenden nicht etwa, daß die Spannung von der Zeit unabhängig ist, sondern, daß ihr Mittelwert und ihr zeitlicher Verlauf unabhängig von der Stärke des entnommenen Stromes ist (vgl. den Artikel „Wechselströme").

wie dasjenige vom Primärstrom zum Sekundärstrom, ist gleich dem Uebersetzungverhältnis; Sekundär- und Primärspannung, sowie Sekundär- und Primärstrom haben entgegengesetzte Phase (180° Phasenverschiebung). Das Vektordiagramm (vgl. den Artikel „Wechselströme") Figur 4 veranschaulicht diese Verhältnisse; aus ihm erhellt auch ohne weiteres der wichtige Satz, daß die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung auf der Primärseite ebenso groß ist wie auf der Sekundärseite. Diese Beziehungen gelten aber nur annähernd wegen der Vernachlässigung des Leerlaufstromes J_0 in Gl. (7);



Fig. 4.

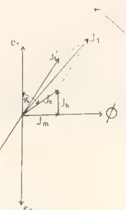


Fig. 5.

sie gelten streng nur für den zusätzlichen Primärstrom J_1'; man erhält den wirklichen Primärstrom J_1 durch Addition der Momentanwerte von J_1' und J_0, d. h. durch geometrische Addition der Vektoren J_1' und J_0, wie es das Vektordiagramm Figur 5 zeigt.

Bei sinusförmigen Spannungen verläuft auch der Induktionsfluß Φ sinusartig, denn wenn $e_1 = \bar{e}_1 \sin \omega t$ ist (ω ist das 2π fache der Periodenzahl), so folgt aus Gl. (4a):

$$(8) \quad \Phi = -\frac{\bar{e}_1}{N_1 \omega} \cos \omega t = \frac{\bar{e}_1}{N_1 \omega} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right);$$

der Vektor der Primärspannung eilt also dem Fluß Φ um 90° vor, der der Sekundärspannung ihm um 90° nach. Die Φ erzeugenden Amperewindungen $N_1 J_0$ und somit der Leerlaufstrom J_0 können aber wegen des komplizierten Zusammenhanges zwischen Φ und $N_1 J_0$ (Fig. 3) nicht sinusförmig verlaufen[1]) und deshalb kann J_0 streng genommen auch nicht durch einen Vektor dargestellt werden. Als Annäherung ist die Vektordarstellung von J_0 aber zulässig.

J_0 zerlegt sich dann in zwei Komponenten: eine, die in Phase mit dem der Primärspannung um 90° nacheilenden Fluß Φ ist und daher keine Energie verbraucht, dem „wattlosen" Magnetisierungsstrom J_m, und eine zweite Komponente J_h, welche die zur Deckung der Hysteresis- und Wirbelstromverluste nötige Leistung liefert und in Phase mit der Primärspannung ist. Bei Transformatoren mit geschlossenem Eisenkreis ist J_m ungefähr gleich J_h, also die Phase φ_0 zwischen e_1 und J_0 nahe gleich 45°; bei offenen Eisenkreisen überwiegt J_m bei weitem, ist also φ_0 nahe gleich 90°.

β) Berücksichtigung von Streuung und Ohmschem Widerstande. Die entwickelte Theorie gibt im wesentlichen auch das Verhalten des wirklichen Transformators wieder. Dieser unterscheidet sich von dem bisher betrachteten idealen Transformator, abgesehen davon, daß die Spulen Widerstand besitzen, durch das Auftreten magnetischer Streuung. Das Wesen dieser Erscheinung besteht darin, daß nicht alle magnetischen Induktionslinien beide Spulen gemeinsam durchsetzen, sondern ein Teil von ihnen die Primär- und die Sekundärspule einzeln umschlingt, wie es Figur 6 zeigt. Diese „Streufelder" tragen zur Transformatorwirkung nichts bei, sondern wirken so wie jedes andere mit einem Stromkreise verkettete Magnetfeld: sie verleihen dem Primär- und Sekundärkreis eine gewisse Selbstinduktion[1]) l_1 und l_2 (vgl. den Artikel „Induktivität"). Die Wirkung der Streuung kann man also ersetzen dadurch, daß man sich vor Primär- und

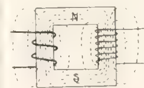


Fig. 6.

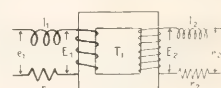


Fig. 7.

Sekundärspule je eine Spule mit dem Selbstinduktionskoeffizienten l_1 bezw. l_2 geschaltet denkt; berücksichtigen wir außerdem die Widerstände r_1 und r_2 von Primär- und Sekundärspule, so erhalten wir für den wirklichen Transformator das Schema der Figur 7, in der T_i einen idealen, streuungs- und widerstandslosen Transformator bedeutet.

Die Wirkung dieser vorgeschalteten Ohmschen und induktiven Widerstände ist nun die, daß in ihnen Spannungsabfälle auftreten. Die primäre EMK. E_1 wird also jetzt um den Betrag der primären Spannungs-

[1]) J_0 hängt in gleicher Weise von der Zeit ab wie der Strom in einer Drosselspule (vgl. den Artikel „Wechselströme").

[1]) Diese „Selbstinduktion" ist nicht zu verwechseln mit der wirklichen Selbstinduktion der für sich allein betrachteten Primär- bezw. Sekundärspule, die vom Hauptfluß Φ herrührt. Diese Selbstinduktion muß hier außer Betracht bleiben, weil wir ja die induzierende Wirkung von Φ durch Gleichung (4a) und (4b) schon direkt berücksichtigt haben.

abfälle kleiner als die primäre Klemmenspannung e_1, die sekundäre Klemmenspannung e_2 um den Betrag der sekundären Spannungsabfälle kleiner als die sekundäre EMK. E_2. Da die Spannungsabfälle dem Strom proportional sind, bewirkt beides bei konstanter Primärspannung ein Sinken der Sekundärspannung mit zunehmendem Belastungsstrom. Die zahlenmäßigen Verhältnisse übersieht man am besten am Vektordiagramm Figur 8: die primäre Klemmenspannung e_1 ergibt sich als geometrische Summe von primärer EMK. E_1, primärem Ohmschen Spannungsabfall $J_1 r_1$ (in Phase mit J_1) und primärem induktivem Spannungsabfall $J_1 l_1 \omega$ (um 90° gegen J_1 voreilend); ähnlich auf der Sekundärseite, nur sind hier die Spannungsabfälle von der EMK. abzuziehen. In der Figur sind die Spannungsabfälle stark übertrieben gezeichnet, in Wirklichkeit betragen sie bei vollem Belastungsstrom nur wenige Prozente der Klemmenspannungen.



Fig. 8.

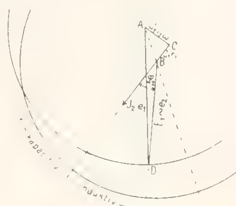


Fig. 9.

Das Kappsche Transformatordiagramm zeigt die Abhängigkeit der Sekundärspannung von der sekundären Phasenverschiebung bei konstantem Sekundärstrom. Wir nehmen an, es treten nur primär Spannungsabfälle auf (in Wirklichkeit lassen sich die sekundären Spannungsabfälle durch entsprechende Vergrößerung der primären streng berücksichtigen); dann wird $E_1 = \frac{1}{U} E_2 = \frac{1}{U} e_2$, also proportional e_2. Der obere Teil von Figur 8 enthält nun alle hier in Betracht kommenden Größen, er ist in Figur 9 noch einmal gezeichnet. Halten wir, der Voraussetzung konstanten Stromes, also auch konstanter Spannungsabfälle AC und CB entsprechend, die Punkte A, B, C fest, so muß sich bei Aenderung der sekundären Phasenverschiebung φ_2 der Punkt D, der Endpunkt der Vektoren e_1 und $E_1 \sim e_2$, auf einem um A beschriebenen Kreise bewegen. Das Diagramm zeigt, daß bei einer gewissen induktiven Phasenverschiebung die Sekundärspannung ein Minimum erreicht, wenn nämlich ihr Vektor in die Verlängerung von $\overline{AB}$ fällt, und daß bei kapazitiver Phasenverschiebung e_2 unter Umständen größer werden kann als bei Leerlauf.

γ) Energieverluste, Wirkungsgrad, Erwärmung. Von der primär in den Transformator hineingeschickten elektrischen Leistung erscheint nur ein Teil auf der Sekundärseite als nutzbare Leistung wieder; der andere Teil wird in Wärme umgewandelt und geht verloren. Solche Energieverluste treten an zwei Stellen auf: Im Eisen („Eisenverluste") als Hysteresis- und Wirbelstromverluste, und im Spulenkupfer („Kupferverluste") infolge der dort entwickelten Jouleschen Wärme. Die Eisenverluste hängen nur vom Induktionsfluß ab und sind deshalb praktisch unabhängig von der Belastung; die Kupferverluste sind proportional dem Quadrate des Stromes, treten also nur bei Belastung auf. Von der Frequenz sind die Kupferverluste nahezu unabhängig; die Eisenverluste und somit auch die Gesamtverluste nehmen aber mit zunehmender Frequenz ab, weil nach Gleichung (8) Φ umgekehrt proportional zu ω ist.

Die Verluste haben einerseits zur Folge eine Verringerung des Wirkungsgrades

$$\eta = \frac{e_2 J_2}{e_1 J_1} = \frac{e_2 J_2}{e_2 J_2 + V_E + V_K} \qquad (9)$$

(V_E = Eisen-, V_K = Kupferverluste); dieser ist bei Leerlauf wegen der Eisenverluste null und steigt mit zunehmender Belastung bis zu einem Maximum, um dann wieder zu sinken; das Maximum wird bei derjenigen Belastung erreicht, für die die Kupferverluste gleich den Eisenverlusten sind. Dieser günstigste erreichbare Wirkungsgrad wächst mit der Größe des Transformators, von 0,92 bis 0,94 bei den kleinsten Modellen für etwa 1 KW. bis zu 0,99 bei den größten Ausführungen (1000 bis 10000 KW.). Da die Kupferverluste nur vom Strom abhängen, werden mit abnehmendem Leistungsfaktor ($\cos\varphi$) die relativen Verluste größer, der Wirkungsgrad kleiner.

Andererseits wird eine den Energieverlusten äquivalente Wärmemenge im Transformator entwickelt und dadurch seine Temperatur erhöht. Das ist sehr wichtig, weil in der Technik nur durch diese Temperaturerhöhung der Belastbarkeit der Transformatoren eine Grenze gesteckt wird. Mit anderen Worten: die Größe eines für eine vorgeschriebene Belastung bestimmten Transformators muß so gewählt werden, daß die Temperatur nicht unzulässig hoch wird. Je kleiner die Verluste sind, um so kleiner wird der Transformator; insbesondere nimmt die Größe mit zunehmender Frequenz erheblich ab. Auch die Bedeutung der Einführung der legierten Bleche beruht viel weniger auf der Stromersparnis, als vielmehr

darauf, daß die aus ihnen hergestellten Transformatoren kleiner und damit billiger werden. Andererseits kann der Transformator um so kleiner werden, je besser die Abkühlungsverhältnisse sind; deshalb verwendet man bei großen Modellen stets künstliche Kühlung (durch Ventilator gekühlte Lufttransformatoren, Oeltransformatoren mit Wasserkühlung).

2b) Starkstromtransformatoren. *α*) Allgemeines. Das Hauptverwendungsgebiet der Transformatoren ist die Starkstromtechnik, wo sie bei der Energieübertragung auf größere Entfernung (Stadtnetze, Ueberlandzentralen) benutzt werden, einmal um den von den Generatoren gelieferten Strom auf eine für die Uebertragung geeignete hohe Spannung hinaufzutransformieren, und andererseits, um an den Verbrauchsstellen die Spannung auf den für die Lampen oder Motoren passenden niedrigen Wert herabzusetzen. Von einem solchen Transformator wird verlangt: möglichst geringe Energieverluste und möglichst geringer Spannungsabfall bei Belastung, also möglichste Annäherung an den oben besprochenen „idealen" Transformator; insbesondere sollen Leerlaufstrom und Streuung klein sein. Dazu ist einerseits ein möglichst gut geschlossener Eisenkreis erforderlich (namentlich müssen die einzelnen Teile des Kreises dort, wo sie zusammenstoßen, sehr genau aneinander passen und fest zusammengepreßt werden; am besten geschieht die Verbindung durch „Verzapfung" oder „Ueberlappung"); andererseits sollen Primär- und Sekundärwicklung sich möglichst nahe beieinander befinden (gut „durchmischt" sein), damit nicht, wie in Figur 6, Magnetpole NS auftreten, die naturgemäß ein starkes Streufeld erzeugen. Die Anordnung Figur 6 ist also schlecht und wird praktisch nicht verwendet, vielmehr werden in Wirklichkeit Primär- und Sekundärwicklung gleichmäßig auf beide Schenkel verteilt. Dabei haben die Wicklungen entweder die Form von Zylinderspulen, die ineinander gesteckt sind (Röhrenwicklung Fig. 10a),

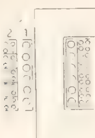


Fig. 10a.

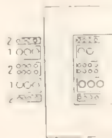


Fig. 10b.

oder von flachen Scheibenspulen, die abwechselnd nebeneinander auf den Eisenkern aufgeschichtet sind (Scheibenwicklung, Fig. 10b); auch bei Röhrenwicklung wird mindestens die Hochspannungswicklung aus mehreren in Reihe geschalteten Spulen aufgebaut, um die in der einzelnen Spule auftretende Potentialdifferenz zu verringern und so die Durchschlagssicherheit zu erhöhen.

Je nach der Anordnung des Eisens unterscheidet man Kerntransformatoren (Fig. 11a), bei denen das Eisen den Kern der Spulen bildet, und Manteltransformatoren (Fig. 11b), bei denen das Eisen

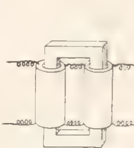


Fig. 11a.

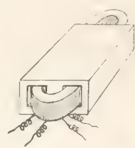


Fig. 11b.

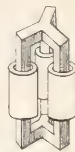


Fig. 11c.

mantelartig die ringförmigen Spulen umgibt; zwischen beiden Formen gibt es Uebergänge. Bei Drehstrom (verkettetem Dreiphasenstrom) verwendet man entweder 3 einzelne Transformatoren, die in Dreieck oder Stern geschaltet werden, oder besondere Drehstromtransformatoren (Fig. 11c). Einen solchen kann man sich aus 3 Einphasentransformatoren nach Figur 11a, aber mit nur je einem bewickelten Schenkel, dadurch entstanden denken, daß man die 3 unbewickelten Schenkel durch einen einzigen ersetzt. Durch diesen fließt dann die Summe der 3 Flüsse; diese ist aber in jedem Augenblick null, man kann den 4. Schenkel daher ganz weglassen.

Kleine und mittelgroße Transformatoren für nicht zu hohe Spannungen erhalten natürliche Luftkühlung; bisweilen wird künstliche Luftkühlung durch ein Gebläse verwendet. Große Transformatoren, sowie solche für höhere Spannungen (über 15 bis 30000 Volt) werden stets in Oel gesetzt, einerseits um das Ueberspringen von Funken zu vermeiden, andererseits zwecks besserer Kühlung; bei großen Leistungen wird das Oel durch wasserdurchströmte Kühlschlangen gekühlt.

Figur 12 zeigt einen fertigen technischen Transformator mit natürlicher Luftkühlung. Transformatoren sind bisher zu Energieübertragungszwecken für Einzelleistungen bis 10000 KW. und Spannungen bis 110000 Volt (in Amerika über 150000 Volt) gebaut worden; Laboratoriumstransformatoren für Prüfzwecke hat man bis zu 1 000 000 Volt hergestellt.

β) Spezialausführungen. Spar- oder Autotransformatoren (Fig. 13) besitzen nur eine einzige Wickelung S mit der Windungszahl N, von der ein Teil P mit der Win-

dungszahl N_1 als Niederspannungswickelung dient. Eine solche Anordnung verhält sich fast genau so wie ein Transformator mit zwei

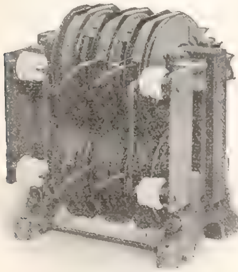


Fig. 12.

getrennten Spulen mit den Windungszahlen N und N_1; der Unterschied ist nur der, daß in dem der Primär- und Sekundärseite gemeinsamen Teil P jetzt die Differenz von Primär- und Sekundärstrom fließt; dadurch werden Spannungsabfall und Kupferverluste kleiner.

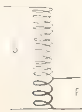


Fig. 13.

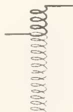


Fig. 14.

Solche Autotransformatoren mit einem von 1 wenig abweichenden Uebersetzungsverhältnis werden häufig als „Spannungserhöher" oder „Booster" in lange Fernleitungen, namentlich solche für Bahnbetrieb, eingeschaltet, um den unterwegs auftretenden Spannungsabfall aufzuheben, wie es Figur 14 zeigt.

Aehnlich eingerichtet sind die Regeltransformatoren (Fig. 15), bei denen durch eine Kontaktkurbel (wie bei einem Kurbelrheostaten) die sekundäre Windungszahl geändert werden kann; sie werden verwendet, um bei schwankender Primärspannung die Sekundärspannung stets auf einen konstanten Betrag regulieren zu können, sowie auch zum Anlassen und Regulieren von Motoren.

Eine andere Art von Regeltransformatoren sind die Induktionsregler (Fig. 16), bei denen durch Verdrehen der Sekundärspule der durch sie hindurchtretende Fluß zwischen einem positiven und negativen Betrag stetig verändert werden kann. Sie werden vorzugsweise bei Drehstrom verwendet und sind dann genau so gebaut wie

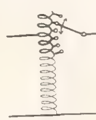


Fig. 15.

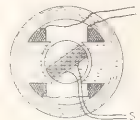


Fig. 16.

ein Asynchronmotor (vgl. den Artikel „Dynamomaschinen").

Endlich seien von Spezialausführungen noch erwähnt die Transformatoren für konstanten Strom, bei denen die Sekundärspule, welche neben der Primärspule auf dem Eisenkern sitzt, beweglich angeordnet ist, so daß sie bei eintretender Stromerhöhung infolge der magnetischen Abstoßung sich von der Primärspule entfernt, bis infolge der dadurch vergrößerten Streuung der Sekundärstrom seinen alten Wert wieder angenommen hat, ferner die Induktionsöfen nach Kjellin zum Stahlschmelzen (Fig. 17), bei denen die Sekundärspule aus einer einzigen Windung, nämlich dem in der ringförmigen Schmelzrinne befindlichen geschmolzenen Metall besteht; auf diese Weise werden in dem Metall ohne Zuführungselektroden sehr starke Ströme erzeugt, welche durch Entwicklung von Joulescher Wärme die erforderliche hohe Temperatur erzeugen.

2c) Meßtransformatoren. Da die Gleichungen (5) und (7) bei kleiner Streuung bezw. Leerlaufstrom sehr genau gelten, so sind Transformatoren vorzüglich geeignet, um hohe Spannungen oder starke Ströme zu Meßzwecken in einem bekannten Verhältnis zu verkleinern und damit den Meßbereich vorhandener Meßinstrumente beliebig zu erweitern.

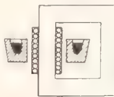


Fig. 17.



Fig. 18.

Gleichzeitig werden so bei Hochspannungsmessungen die Meßinstrumente gegen die Hochspannungsleitung isoliert und gefahrloses Arbeiten ermöglicht. Meßtransformatoren sind genau so gebaut wie Starkstromtransformatoren. Man unterscheidet „Spannungswandler", die so berechnet sind, daß das Verhältnis der Spannungen möglichst genau gleich dem Ueber-

setzungsverhältnis ist (geringe Streuung, aber größerer Leerlaufstrom), und „Stromwandler", die für möglichst genaues Verhältnis der Ströme berechnet sind (geringer Leerlaufstrom, aber größere Streuung). Bei stärkeren Strömen genügt eine einzige Primärwindung; die Leitung, in der der Strom gemessen werden soll, wird dann einfach durch den Eisenkreis des Transformators durchgesteckt, wie es Fig. 18 zeigt. Vielfach wird bei solchen Transformatoren der Eisenkreis aufklappbar eingerichtet; man kann so den Strom in einer im Betrieb befindlichen Leitung messen, ohne sie zu unterbrechen. Meßtransformatoren geben auch Phase und Kurvenform der zu messenden Spannungen oder Ströme genau wieder, und können deshalb auch zu wattmetrischen und oszillographischen Messungen verwendet werden; sie werden heute als Präzisionsinstrumente gebaut mit einer Inkonstanz von nur wenigen Promillen im Uebersetzungsverhältnis und einem Phasenfehler von nicht mehr als 10 Bogenminuten.

Meßtransformatoren sind nur bei „reinen" Wechselspannungen und Strömen brauchbar; die geringste Gleichstromkomponente kann wegen der durch sie hervorgerufenen magnetischen Sättigung zu erheblichen Fehlern Anlaß geben (Zenneck).

2d) Induktoren und Resonanzinduktoren. Mit dem Namen Induktoren bezeichnet man Transformatoren mit offenem magnetischem Kreis (Fig. 1a und 1b), wie sie vorzugsweise zur Erzeugung von hochgespanntem Wechselstrom aus unterbrochenem Gleichstrom verwendet werden und unten (s. Abschnitt 3) ausführlich besprochen sind. Solche Induktoren werden vielfach auch mit technischem Wechselstrom betrieben; sie besitzen, wenn es sich um die Erzeugung von Funken oder Betrieb von Röntgenröhren handelt, dem eisengeschlossenen Transformator gegenüber zwei Vorteile: erstens ist der durch die starke Streuung bedingte große Spannungsabfall bei Stromentnahme hier günstig und sogar notwendig, weil ohne ihn nach dem Einsetzen des Stromes durch die leitend gewordene Funkenbahn oder Röntgenröhre sofort ein starker Strom fließen würde, der den Funken in einen Lichtbogen verwandeln bezw. die Röntgenröhre zerstören würde, und zweitens wird — beim Funken häufig, bei der Röntgenröhre stets — der Sekundärstrom nur in einer Richtung durchgelassen; die so hervorgerufene starke Gleichstromkomponente in der Sekundärspule bewirkt, da sie nicht, wie ein Wechselstrom, durch einen automatisch auftretenden zusätzlichen Primärstrom kompensiert wird, bei geschlossenem magnetischem Kreise eine sehr starke Sättigung des Eisens, welche die Wirkung des Transformators erheblich herabsetzt.

Den ersten Vorteil, Vermeidung von Lichtbogenbildung, besitzt, wenn es sich um die Erzeugung von Kondensatorfunken handelt, in noch höherem Maße die Resonanzschaltung des Transformators, welche in Fig. 19 schematisch dargestellt

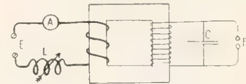


Fig. 19.

ist. Ihr Wesen besteht darin, daß vor die Primärseite des Transformators, an dessen Sekundärseite der aufzuladende Kondensator C parallel mit der Funkenstrecke F geschaltet ist, eine veränderliche Selbstinduktion L geschaltet wird. Die Wirkungsweise dieser Anordnung beruht darauf, daß ein Transformator, der sekundär mit einer Kapazität belastet ist, wegen der Gleichheit von primärer und sekundärer Phasenverschiebung sich primär selbst wie ein Kondensator verhalten muß; den aus diesem äquivalenten Kondensator und der Selbstinduktion L bestehenden schwingungsfähigen Kreis stimmt man nun durch Verändern von L auf Resonanz (vgl. den Artikel „Wechselströme") mit der Periode der primären Spannung E ab, und erhält so eine vielmals höhere Sekundärspannung, was allein schon ein erheblicher Vorteil gegenüber der gewöhnlichen Schaltung ist. Der Hauptvorteil der Resonanzschaltung beruht aber, wie gesagt, auf der Vermeidung der Lichtbogenbildung. Denn genau so wie ein in „Resonanz", d. h. im Rhythmus seiner Eigenschwingungszahl angestoßenes Pendel erst nach einer beträchtlichen Anzahl von Schwingungen seine volle Amplitude erreicht, so tritt auch hier die volle Sekundärspannung erst nach Ablauf mehrerer Perioden des Wechselstromes auf; nachdem also durch Uebergang eines Funkens bei F der Kondensator C entladen ist, bleibt die Spannung von F zunächst, bis sie sich wieder „hochgeschaukelt" hat, eine Zeitlang sehr klein, so daß ein Lichtbogen sich nicht bilden kann.

Bei Verwendung eines Transformators mit offenem Eisenkreis, dessen große Streuung ja wie eine vorgeschaltete Selbstinduktion wirkt, kann die Selbstinduktionsspule L wegfallen und die Abstimmung auf Resonanz durch Veränderung von C bewirkt werden; oder man stimmt ab durch Veränderung der Streuung des Transformators,

wie beim Boasschen Resonanzinduktor (Fig. 20), bei dem dies durch Entfernen

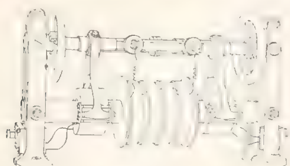


Fig. 20.

der beiden, zu beiden Seiten der Sekundärwickelung angeordneten Primärspulen von der Sekundärwickelung geschieht.

In der Funkentelegraphie werden die Transformatoren oder Induktoren jetzt fast ausschließlich in Resonanzschaltung verwendet.

2e) Telephontransformatoren. Da, wie oben gezeigt, bei konstantem Widerstande des Sekundärstromkreises der Sekundärstrom stets ein „reiner" Wechselstrom ist, lassen sich Transformatoren zur Trennung von Gleichstrom und Wechselstrom verwenden. Dies geschieht vor allem bei den Telephontransformatoren, welche aus dem durch das Mikrophon fließenden, in seiner Stärke im Rhythmus der auftretenden Schallwellen schwankenden Strom den für die Uebertragung der Sprache allein in Betracht kommenden Wechselstromanteil aussondern und gleichzeitig auf eine für die Fernleitung günstigere höhere Spannung bringen. Auch hier sind nur Transformatoren mit offenem Eisenkreis verwendbar, weil die Vorteile des geschlossenen Eisenkreises hier, ebenso wie bei den Induktoren, durch die von der Gleichstromkomponente hervorgerufene starke magnetische Sättigung mehr als aufgehoben wurden.

3. Induktor mit Gleichstrombetrieb. Eine zweite und nebenbei die älteste Verwendungsart der Transformatoren ist die zur Erzeugung hoher Spannungen aus unterbrochenem Gleichstrom. Die hierbei verwendeten Transformatoren haben aus den oben (1 b) angeführten Gründen stets offenen magnetischen Kreis und heißen „Induktoren". Das Schaltungsschema eines solchen Induktors zeigt Figur 21: die Primärwicklung ist über einen Unterbrecher U mit einer Gleichstromquelle von der Spannung E_0 (Gleichstromnetz, Batterie) verbunden. Der Unterbrecher hat den Zweck, aus dem von der Stromquelle gelieferten konstanten Strom den zur Erzielung einer Induktionswirkung notwendigen veränderlichen Strom zu machen; er besteht (wenn wir von den weiter unten besprochenen elektrolytischen Unterbrechern zunächst absehen) aus einem mechanisch bewegten Kontakt, welcher den Stromkreis abwechselnd schließt und öffnet.

3a) Induktionsapparat. Zum leichteren Verständnis des Folgenden sei zunächst der einfachste Typ einer solchen Induktoranordnung, der „Induktionsapparat", wie er einerseits zu medizinischen



Fig. 21.

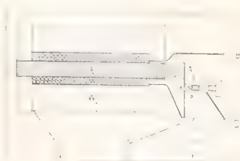


Fig. 22.

Zwecken („Faradisation"), andererseits zur Erzeugung schwacher Wechselströme zu Meßzwecken (Wheatstonesche Brücke) viel benutzt wird, beschrieben. Figur 22 zeigt einen solchen Apparat von oben gesehen; die Spulen sind im Schnitt gezeichnet: auf dem Eisenkern E, der meist aus Drähten besteht, befindet sich, durch eine Isolationsschicht getrennt, zunächst die aus relativ wenigen (einigen hundert) Windungen dickeren Drahtes bestehende Primärwicklung W_1, auf dieser, wieder durch Isolation getrennt, die Sekundärwicklung W_2, deren Enden zu den Klemmen S_1 und S_2 geführt sind. Der Unterbrecher ist an den Apparat gleich angebaut; es ist ein „Neefscher Hammer" (auch „Hammerunterbrecher" genannt), dessen Wirkungsweise von der elektrischen Klingel her bekannt ist: Der Strom geht von der Batterie, die mit den Klemmen B_1 und B_2 verbunden zu denken ist, über den aus der Platinspitze s, die durch eine Schraube verstellbar ist, und dem Platinplättchen p bestehenden Unterbrecherkontakt zur Primärspule und von da wieder zur Batterie zurück. p sitzt an einer in der Säule C befestigten Feder f, die vorn den dem Eisenkern E gegenüberstehenden Anker A trägt. Beim Einschalten des Stromes wird der Eisenkern E magnetisiert und zieht den Anker A an, so daß p von s entfernt und der Strom unterbrochen wird; dadurch wird E wieder unmagnetisch, läßt A los, der Strom wird durch den Kontakt sp wieder geschlossen und das Spiel beginnt von neuem.

Die Theorie des Induktors in dieser Betriebsweise läßt sich nicht ohne weiteres auf die oben gegebene Theorie des Wechselstromtransformators zurückführen, weil wir hier nicht mit einem bestimmten vorgegebenen Verlauf der Primärspannung oder des Primärstromes rechnen können, vielmehr der Verlauf beider erst durch die Vorgänge im Transformator selbst bestimmt wird; außerdem sind wegen der großen, durch den offenen magnetischen Kreis bedingten Streuung die

magnetischen Flüsse durch Primär- und Sekundärspule so verschieden, daß es sich empfiehlt, überhaupt nicht mit dem Fluß Φ zu rechnen, sondern statt dessen die Selbstinduktionskoeffizienten L_1 und L_2 und den gegenseitigen Induktionskoeffizienten M zur Berechnung der induzierten Spannungen zu benutzen (s. S. 1273).

Den einfachsten Fall haben wir, wenn der Sekundärkreis offen ist; dann ist die Sekundärspannung gleich der induzierten EMK., und diese ist nach Gleichung (3) gleich dem Koeffizienten M der gegenseitigen Induktion, multipliziert mit der Aenderungsgeschwindigkeit des Primärstromes:

$$E_2 = -M\,\frac{dJ_1}{dt}. \qquad (10)$$

Der Verlauf des Primärstromes ist genau so, als wenn die Sekundärspule nicht vorhanden wäre; er ist in dem oberen Teile von Figur 23 graphisch dargestellt: Während der Unterbrecher geschlossen ist, steigt der Primärstrom an, und zwar nicht momen-

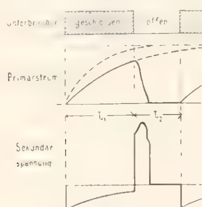


Fig. 23.

tan, sondern wegen der Selbstinduktion L_1 allmählich, nach einem Exponentialgesetz:

$$J = E_0/r_1(1 - e^{-t/T}), \qquad (11)$$

nähert sich also dem durch das Ohmsche Gesetz bestimmten stationären Werte E_0/r_1 asymptotisch (vgl. den Artikel „Wechselströme"). Der Anstieg erfolgt um so schneller, je kleiner die Zeitkonstante $T = \frac{L_1}{r_1}$ des Primärkreises, also je kleiner die Selbstinduktion L_1 und je größer der Widerstand r_1 ist. Weil der Unterbrecher nur eine kurze Zeit geschlossen ist, erreicht der Primärstrom nicht den vollen stationären Wert E_0/r_1, sondern stets nur einen Bruchteil davon, der um so kleiner ist, je kürzer die Schließungszeit τ_1 ist.

Oeffnet dann der Unterbrecher den Primärkreis, so müßte bei einem ideal arbeitenden Unterbrecher der Primärstrom momentan aufhören. Das ist aber in Wirklichkeit unmöglich, weil dann die Aenderungsgeschwindigkeit $\frac{dJ_1}{dt}$ des Primärstromes unendlich groß würde und somit wegen der Selbstinduktion L_1 der Primärspule eine unendlich große Spannungsdifferenz $-L_1\,\frac{dJ_1}{dt}$ an den Enden der Primärspule auftreten würde. In Wirklichkeit gleicht sich diese Spannung über die Kontakte des Unterbrechers, die in diesem, unmittelbar auf die Oeffnung folgenden Augenblick erst ganz wenig voneinander entfernt sind, durch einen Funken oder Lichtbogen (Oeffnungsfunken) aus und schafft so eine Brücke, durch die der Primärstrom weiter fließen kann. So kommt es, daß der Primärstrom in einer endlichen Zeit auf Null abnimmt; über das Gesetz der Abnahme, das durch den Funken bestimmt ist, haben wir keine Kenntnis.

Aus diesem Verlauf des Primärstromes ergibt sich in einfachster Weise die Sekundärspannung nach Gleichung (10) als proportional seiner Aenderungsgeschwindigkeit, d. h. der Tangente des Neigungswinkels der Stromkurve in Figur 23 gegen die Abszissenachse. Ihren Verlauf zeigt der untere Teil der Figur 23; als charakteristisch ist hervorzuheben: Die beim Schließen des Primärkreises induzierte „Schließungsspannung" ist der „Oeffnungsspannung" entgegengesetzt gerichtet und sehr viel kleiner als diese, weil die Aenderung des Primärstromes beim Oeffnen sehr viel schneller erfolgt als beim Schließen; dafür dauert die Schließungsspannung längere Zeit an als die Oeffnungsspannung; die von dem negativen und positiven Kurventeil mit der Abszissenachse eingeschlossenen Flächen sind inhaltsgleich. Praktisch spielt nur die Oeffnungsspannung eine Rolle. Sie ist cet. par. proportional dem Koeffizienten M der gegenseitigen Induktion zwischen Primär- und Sekundärspule. Induktionsapparaten für medizinische Zwecke gibt man vielfach, um die Sekundärspannung regulieren zu können, ein veränderliches M, indem man die Sekundärspule längs der Primärspule auf einem Schlitten verschiebbar anordnet. Bei anderen Apparaten wird eine Regulierung durch Einschieben eines Kupferrohres zwischen Primär- und Sekundärwickelung oder zwischen Primärwickelung und Eisenkern erreicht; die in diesem Rohr induzierten Ströme schwächen das Magnetfeld und verringern so die Sekundärspannung, und zwar um so mehr, je weiter das Kupferrohr eingeschoben ist.

Die Spannung an der Primärspule ist, solange der Ohmsche Spannungsabfall zu vernachlässigen ist (d. i. zu Beginn der Schließungsperiode, solange der Primärstrom geradlinig ansteigt, sowie während der ganzen Oeffnungsperiode) annähernd

$$(12)\quad E_1 = -L_1 \frac{dJ_1}{dt} - \frac{L_1}{M} E_2 = \sim \frac{N_1}{N_2} E_2,$$

ähnlich wie beim technischen Transformator (Gleichung 5). Während der Schließungsperiode ist $E_1 = E_0$, solange also Gleichung (12) gilt, d. h. im Anfang der Schließungsperiode, ist die Sekundärspannung gleich der Batteriespannung E_0, multipliziert mit dem Uebersetzungsverhältnis. Die primäre Oeffnungsspannung ist dagegen erheblich größer als E_0; sie wird vielfach an Stelle der Sekundärspannung zu medizinischen Zwecken benutzt; bei den Induktionsapparaten ist hierfür meist noch eine besondere Klemme vorgesehen (P in Fig. 22).

MacFarlan Moore setzt den ganzen Unterbrecher in ein sehr hoch evakuiertes Glasgefäß; dadurch wird der Oeffnungsfunke ganz erheblich verringert und die primäre Oeffnungsspannung so hoch, daß sie z. B. zum Betriebe von Geißlerröhren ausreicht; die Sekundärspule ist dann überflüssig („Einspuleninduktor mit Vakuumunterbrecher").

Ganz ähnlich wie nach Figur 23 verlaufen Primärstrom und sekundäre EMK., wenn die Sekundärspule durch einen konstanten Widerstand, z. B. den menschlichen Körper, geschlossen ist, so daß ihr Strom entnommen wird. Die Wirkung dieses Sekundärstromes ist dieselbe wie beim technischen Transformator; er ruft einerseits einen Spannungsabfall in der Sekundärspule hervor und bewirkt so eine, meist beträchtliche Verminderung der sekundären Klemmenspannung gegenüber der EMK., andererseits ist er dem Primärstrom annähernd entgegengerichtet und hebt dessen Magnetfeld zum großen Teil auf, d. h. in der hier benutzten Ausdrucksweise: er wirkt so, als ob die Selbstinduktion des Primärkreises verkleinert worden wäre. Das hat in der Schließungsperiode ein schnelleres Ansteigen des Primärstromes (punktierte Kurve in Fig. 23) zur Folge und damit (bei konstanter Schließungsdauer τ_1) eine Vergrößerung des Primärstromes, ähnlich wie beim technischen Transformator. In der Oeffnungsperiode bewirkt die Verkleinerung der Selbstinduktion eine Verringerung des Oeffnungsfunkens am Unterbrecher und damit einen schnelleren Abfall des Primärstromes. Beides erhöht die Sekundärspannung und gleicht somit den sekundären Spannungsabfall zum Teil wieder aus.

3b) Funkeninduktor. α) Allgemeines. In der bisher betrachteten Anordnung gibt der Induktor nur relativ geringe Sekundärspannungen (einige Millimeter Funkenlänge) und vor allem nur geringe Leistung. Das liegt an dem am Unterbrecher auftretenden Oeffnungsfunken, der in dem Maße, wie man die Leistung durch Erhöhung von Primärstrom und -spannung zu steigern versucht, stärker wird und so ein schnelles Verschwinden des Primärstromes, wie es zur Erzeugung einer hohen Sekundärspannung nötig ist, verhindert. Es gibt aber ein außerordentlich wirksames Mittel, den primären Oeffnungsfunken ganz erheblich zu verringern: das ist die von Fizeau angegebene Einschaltung eines Kondensators parallel zum Unterbrecher (Fig. 24).



Fig. 24.

Funkeninduktoren werden jetzt stets (soweit sie nicht mit elektrolytischen Unterbrechern betrieben werden) mit Kondensator ausgerüstet. Die Wirkungsweise des Kondensators ist analog der eines Windkessels: Ebenso wie ein in einer Wasserleitung angeordneter Windkessel den beim plötzlichen Absperren des Wassers infolge seiner Trägheit entstehenden Stoß mindert, indem er der Wassermasse Gelegenheit gibt, noch eine Zeitlang in den Windkessel hineinzufließen und so allmählich zur Ruhe zu kommen, so vermindert auch der Kondensator den bei plötzlicher Stromunterbrechung infolge der Trägheit (Selbstinduktion) der Elektrizität auftretenden Spannungsstoß, indem er der Elektrizität Gelegenheit gibt, noch weiter in den Kondensator hineinzufließen und ihn aufzuladen, so daß der Strom nur allmählich aufhört und seine Aenderungsgeschwindigkeit $\frac{dJ_1}{dt}$ relativ klein bleibt; auf diese Weise wird der Oeffnungsfunke, falls die Kapazität des Kondensators genügend groß ist, vollkommen unterdrückt.

β) Theorie, Leerlauf. Durch die Unterdrückung des Oeffnungsfunkens wird der Verlauf des Primärstromes und damit der Sekundärspannung nach der Unterbrechung der Rechnung zugänglich. Vorausgeschickt sei eine qualitative Betrachtung: mit dem erstmaligen Aufhören des Primärstromes hat der Vorgang der Stromöffnung noch nicht sein Ende erreicht; denn der Kondensator ist in diesem Augenblick ja durch die Selbstinduktionsspannung auf ein weit höheres Potential als die Batteriespannung E_0 aufgeladen, und fängt nun an, sich rückwärts durch die Batterie und Primärspule zu entladen, so daß der Strom jetzt im entgegengesetzten Sinne fließt; kurz, es treten, wie stets bei einem aus Selbstinduktion L und Kapazität C bestehenden System, Schwingungen auf, deren Periodenzahl n in bekannter Weise annähernd durch die Thomsonsche Formel

$$(13)\qquad n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

bestimmt ist, und zwar müssen diese Schwingungen wegen der Energieverluste im Ohmschen Widerstande der Primärspule und im Eisenkern allmählich an Stärke abnehmen, „gedämpft" sein. Solche Schwingungen von Primärstrom und Sekundärspannung sind in der Tat häufig experimentell festgestellt worden.

Die Rechnung (Colley) liefert, wenn wir die Zeit t vom Momente der Unterbrechung an rechnen, für den Verlauf des Primärstromes J unter einigen vereinfachenden Annahmen:

$$(14) \quad J = J_0 e^{-\delta t}\left(\cos \omega t + \frac{\delta}{\omega} \sin \omega t\right)$$

(J_0 ist der Betrag des Primärstromes im Augenblick der Unterbrechung, δ die Dämpfungskonstante und $\omega = 2\pi n = 1/\sqrt{L_1 C}$ das 2πfache der Eigenfrequenz), und für den Verlauf der primären Selbstinduktionsspannung (die hier, wo der Ohmsche Spannungsabfall vernachlässigt werden darf, annähernd gleich der primären Klemmenspannung ist):

$$(15) \quad E_L = J_0 \sqrt{\frac{L_1}{C}}\, e^{-\delta t} \sin \omega t.$$

Figur 25 gibt den diesen Formeln entsprechenden Verlauf von Strom und Spannung graphisch wieder; Schließungsstrom und Schließungsspannung, die durch den Kondensator nicht beeinflußt werden, sind ebenfalls mit eingetragen. Die durch Formel (15) und Figur 25 gegebene Spannung E_L ist

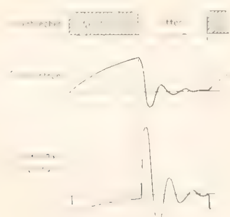


Fig. 25.

auch nahezu identisch mit der an den Unterbrecherkontakten auftretenden Spannung, von der sie sich nur um den relativ kleinen Betrag der Batteriespannung E_0 unterscheidet. Die Formel zeigt, daß diese Oeffnungsspannung umgekehrt proportional der Wurzel aus der Kapazität C ist, also in der Tat durch Wahl eines genügend großen Kondensators beliebig klein gemacht werden kann. Wichtig ist auch, daß, wie aus Formel (15) und noch deutlicher aus der Figur hervorgeht, die Oeffnungsspannung nicht plötzlich, wie bei Abwesenheit des Kondensators, sondern allmählich (zuerst nahezu proportional der Zeit) ansteigt; das ist sehr günstig, weil dadurch in den ersten Augenblicken nach der Unterbrechung, in denen wegen der dann noch vorhandenen geringen Entfernung der Unterbrecherkontakte die Gefahr eines Funkenüberganges besonders groß ist, die Spannung klein gehalten wird.

Da nach Gleichung (12) die Sekundärspannung der induktiven Primärspannung proportional ist, so gibt Gleichung (15) und die untere Kurve von Figur 25 bis auf den unwesentlichen Proportionalitätsfaktor $L_1/M = -N_1/N_2$ auch den Verlauf der Sekundärspannung wieder. Aus Gleichung (15) geht hervor, daß die Sekundärspannung proportional dem Betrag J_0 des Primärstromes am Ende der Schließungsperiode, und umgekehrt proportional der Wurzel aus der Kapazität ist. Danach müßte die Sekundärspannung E_2 mit abnehmender Kapazität C zunehmen, so wie es die gestrichelte Kurve in Figur 26 zeigt, und mit verschwindender Kapazität über alle Grenzen wachsen. In Wirklichkeit beobachtet man dagegen die durch die ausgezogenen Kurven (nach Versuchen von Mizuno) dargestellte Abhängigkeit; bei großem C hat die Sekundärspannung (hier gemessen durch die maximale beobachtete Funkenlänge) annähernd den theoretischen Verlauf; unterhalb eines gewissen Wertes von C wird E_2 aber ganz erheblich kleiner. Die Ursache dieser Abweichung bildet der primäre Oeffnungsfunke, der mit abnehmender Kapazität immer stärker wird; erst wenn die Kapazität so groß genommen wird, daß der Oeffnungsfunke vollkommen unterdrückt wird, erreicht die Sekundärspannung den theoretischen Wert. Dieser Wert von C ist nach Figur 26 offenbar der günstigste,

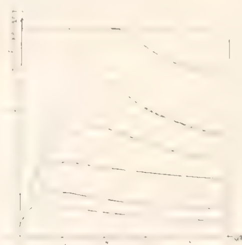


Fig. 26.

weil für ihn die Sekundärspannung ihren größtmöglichen Betrag erreicht; weitere Vergrößerung von C ist schädlich, weil dadurch die Sekundärspannung herabgesetzt wird. Die günstigste Kapazität ist um so

größer, je leichter unter sonst gleichen Umständen der Unterbrechungsfunke sich ausbilden kann, also je größer der unterbrochene Primärstrom und je geringer die Abreißgeschwindigkeit der Unterbrecherkontakte ist. Große Induktoren werden deshalb mit einem Kondensator ausgerüstet, der aus mehreren nach Art eines Gewichtssatzes abgemessenen Teilen besteht, so daß sich durch Einschaltung einzelner oder mehrerer Teile die günstigste Größe der Kapazität den Betriebsbedingungen entsprechend einstellen läßt.

γ) Theorie, Belastung. Diese noch ziemlich übersichtlichen Verhältnisse werden wesentlich komplizierter, wenn in der Sekundärspule ein Strom fließt. Schon in dem einfachsten Falle, daß die Sekundärspule durch einen konstanten Widerstand geschlossen ist, lassen sich die Ergebnisse der Rechnung nicht mehr in übersichtlicher Form darstellen; in Wirklichkeit werden Induktoren aber sekundär nie mit konstanten Widerständen, sondern durch Funken, Röntgenröhren oder Kapazitäten belastet; hier sind wir allein auf qualitative Ueberlegungen und Wiedergabe der beobachteten Erscheinungen angewiesen.

Allgemein kann man sagen, daß beim Auftreten eines Sekundärstromes ein wesentlicher von der Selbstinduktion der Sekundärspule herrührender Spannungsabfall auftritt, der um so größer ist, je größer diese Selbstinduktion ist. Um die Leistungsfähigkeit eines Induktors zu bezeichnen, genügt deshalb die früher allein übliche Angabe der Funkenlänge (d. h. der Leerlaufspannung) nicht; vielmehr ist noch eine das Verhalten bei Belastung kennzeichnende Angabe erforderlich, z. B. die Größe der Kapazität C_2, welche auf diese Funkenspannung aufgeladen werden kann, oder die Energie ($\frac{1}{2} C_2 E_2^2$), die in den Einzelfunken hineingegeben werden kann.

Belastung durch Funken (ähnliche Verhältnisse auch bei Röntgenröhren). Von den Eigenschaften des Funkens ist für uns von Wichtigkeit: 1. Der Funke setzt erst ein, wenn die Spannung einen bestimmten Wert überschreitet; 2. er erlischt, wenn der Strom längere Zeit unter einen bestimmten Betrag sinkt; 3. so lange der Funken vorhanden ist, d. h. ein Strom durch ihn hindurchgeht, ist die Spannung zwischen den Elektroden der Funkenstrecke sehr klein. In dem Moment, in dem der Funken einsetzt, wird daher die Spannung an den Enden der Sekundärspule und somit auch an der Primärspule und am Unterbrecher wesentlich verringert. Nun steigt, wie wir oben sahen, die Spannung am Unterbrecher allmählich an; der primäre Oeffnungsfunke setzt nicht sofort nach erfolgter Unterbrechung ein, sondern erst, wenn der Primärkondensator auf eine genügende Spannung aufgeladen ist. Ist nun die sekundäre Funkenstrecke so kurz, daß der Sekundärfunke einsetzt, bevor der primäre Oeffnungsfunke aufgetreten ist, so wird dadurch die Spannung an den Unterbrecherkontakten so weit verringert, daß der Primärfunke überhaupt nicht mehr einsetzen kann; durch sekundäre Belastung des Induktors kann also ein bei Leerlauf vorhandener Unterbrechungsfunke unterdrückt werden, wie man dies in der Tat auch häufig beobachtet.

Den Verlauf des Sekundärstromes bei Belastung durch Funken hat u. a. Corbino oszillographisch untersucht; der Strom verläuft, entsprechend den Schwingungen der Spannung (Fig. 25) periodisch, und zwar besteht er, wie Fig. 27 zeigt, aus einem nahezu linear abfallenden Anteil, über welchen gedämpfte Schwingungen übergelagert sind. Bei kurzen Funken („Funken mit Aureole") ist die Amplitude der Schwingungen relativ klein (Fig. 27a); sie wächst mit der Verlängerung der Funkenstrecke, aber auch bei der größten Länge der Funkenstrecke, bei der noch Funken übergehen (blaue, knatternde

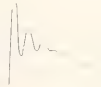


Fig. 27a.

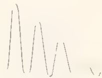


Fig. 27b.

Funken), bleibt die Amplitude der Schwingungen im Vergleich zu der des linear abklingenden Teiles so klein, daß der Strom immer nur in einer Richtung fließt (Fig. 27b); in diesem Falle wird der Strom zwischen zwei aufeinander folgenden Maxima Null; im rotierenden Spiegel betrachtet, erscheint der Funke aus mehreren aufeinander folgenden getrennten Entladungen zu bestehen (Partialfunken).

Belastung durch sekundär angeschlossene Kapazität. In diesem Falle bildet die Sekundärspule mit der Sekundärkapazität zusammen ein schwingungsfähiges System, das durch den Induktor mit dem ebenfalls schwingungsfähigen Primärsystem „gekoppelt" ist; die Theorie solcher „gekoppelter Systeme" (vgl. den Artikel „Magnetfeldwirkungen") führt zu dem Ergebnis, daß bei fester Koppelung, wie sie hier vorliegt, das Gesamtsystem stets zwei Eigenschwingungen von verschiedener Frequenz besitzt (auch wenn die Eigenfrequenzen der für sich allein betrachteten Einzelsysteme übereinstimmen). Bei der Unterbrechung des Primärstromes werden nun stets diese beiden Eigenschwingungen an-

geregt und superponieren sich, so daß man z. B. im Sekundärkreis einen Stromverlauf erhält, wie ihn die ausgezogene Kurve der Figur 28 darstellt, die als Superposition einer

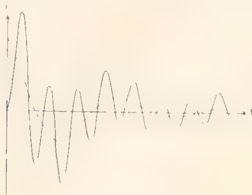


Fig. 28.

langsamen, relativ stark gedämpften Schwingung (gestrichelte Kurve) und einer schnellen, schwach gedämpften Schwingung anzusehen ist. Eine quantitative Theorie dieses Falles existiert bisher nicht; es liegen nur Rechnungen vor, die unter vereinfachenden, aber von der Wirklichkeit sehr weit entfernten Annahmen (sehr lose Koppelung, Vernachlässigung der Widerstände) ausgeführt worden sind (Colley, Armagnat, Schnell).

Die Sekundärspule eines jeden Induktors besitzt stets auch selbst eine gewisse Kapazität. Diese Kapazität ist immer sehr klein (Größenordnung einige Zentimeter) und spielt deshalb bei kleinen Induktoren keine Rolle; bei großen Induktoren ist aber die Selbstinduktion der Sekundärspule so groß, daß die Eigenschwingungszahl des Sekundärsystemes trotz der kleinen Kapazität von der Größenordnung der primären Schwingungszahl werden kann und ähnliche Schwebungserscheinungen auftreten können, wie wenn der Induktor sekundär mit einer Kapazität belastet wäre. Die Eigenkapazität der Sekundärspule ist über die ganze Spule verteilt; das bewirkt, daß der Strom nicht an allen Stellen der Spule der gleiche, sondern in den den Endklemmen benachbarten Teilen der Wicklung am kleinsten, in der Mitte am größten ist; die Spule schwingt nach Art der Seibtschen Spulen (vgl. den Artikel „Elektrische Schwingungen") in ihrer Grundschwingung und wohl auch in Oberschwingungen, mit „Knoten" des Stromes und „Bäuchen" der Spannung an den Enden. Ob, wie von manchen Seiten vermutet wird, die Oberschwingungen im Betrieb eine wesentliche Rolle spielen, ist noch nicht aufgeklärt.

Hierher gehört auch folgende, durch die verteilte Kapazität hervorgerufene Erscheinung: In dem Augenblicke, in dem der Sekundärfunke einsetzt, wird die Spannung zwischen den Klemmen der Sekundärspule plötzlich, fast unstetig, Null. Da aber jeder Punkt, jede Windung der Sekundärspule eine gewisse Kapazität besitzt, und diese Teilkapazitäten wegen der Selbstinduktion der einzelnen Windungen sich nicht plötzlich, sondern nur allmählich entladen können, bleibt im ersten Augenblicke nach der Entladung die vorher vorhandene Spannungsverteilung innerhalb der Sekundärspule bestehen; während die Klemmen also schon auf die Potentialdifferenz Null entladen sind, ist an den Enden der Wicklung noch nahezu die volle Spannung vorhanden; diese ganze Spannung tritt daher zwischen ganz wenigen Windungen an den Spulenenden auf und kann zu Funkenübergängen und Kurzschlüssen innerhalb der Wicklung Veranlassung geben. Aus diesem Grunde müssen die Endwindungen immer besonders stark isoliert sein.

δ) Energieverhältnisse. In bezug auf die Energieumwandlung besteht ein prinzipieller Unterschied zwischen einem mit Wechselstrom und einem mit unterbrochenem Gleichstrom betriebenen Induktor: während bei ersterem Primärstrom und Sekundärstrom gleichzeitig fließen und die vom Sekundärkreis dem magnetischen Feld entzogene Energie gleichzeitig vom Primärkreis nachgeliefert wird, sind beim Gleichstrombetrieb Verbrauch und Erzeugung der magnetischen Energie zeitlich getrennt; während der Schließungsperiode wird in der Primärspule und dem mit ihr verketteten Magnetfelde eine magnetische Energie von der Größe $\frac{1}{2} L_1 J_0^2$ aufgespeichert; bei der Unterbrechung des Primärstromes geht diese Energie, soweit sie nicht im Oeffnungsfunken verbraucht wird, auf den Sekundärkreis über und tritt dort als elektrische Energie wieder auf. Daher kommt es, daß, während beim Wechselstromtransformator die pro Periode übertragene Energie erheblich größer werden kann als der maximale Vorrat an magnetischer Energie, bei Gleichstrombetrieb die Sekundärleistung pro Unterbrechung höchstens gleich der aufgespeicherten Energie $\frac{1}{2} L_1 J_0^2$ werden kann. Das ist mit ein Grund dafür, daß man beim Induktor für Gleichstrombetrieb im Gegensatz zum Wechselstromtransformator stets offenen Eisenkreis verwendet, weil in einem solchen ein viel größerer Energiebetrag aufgespeichert werden kann.

Wenn wir von den Verlusten (im Oeffnungsfunken, Kondensator und Spulen) absehen, ist die pro Unterbrechung sekundär verfügbare Energie gleich $\frac{1}{2} L_1 J_0^2$, also, unabhängig von Größe und Windungszahl der Sekundärspule und von der Art der Sekundärbelastung, nur durch die Anordnung des Primärkreises bestimmt. Wenn man also die Spannung eines gegebenen Induktors durch Vergrößerung der sekundären Windungszahl erhöht, so wird dadurch der Sekundärstrom, weil die Leistung konstant bleiben muß, in entsprechendem Maße verkleinert. Erhöhung der Sekundärspannung

ohne Verringerung des Sekundärstromes ist nur möglich durch gleichzeitige Vergrößerung der Dimensionen von Primärspule und Eisenkern.

ε) Aufbau von Funkeninduktoren. Funkeninduktoren sind ähnlich aufgebaut (Fig. 29), wie die oben beschriebenen kleinen

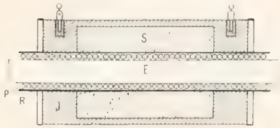


Fig. 29.

Induktionsapparate: Gerader[1]), aus Blechen oder Drähten hergestellter Eisenkern, darauf die Primärspule gewickelt; über die Primärspule ist die Sekundärspule geschoben. Der Eisenkern E wird etwa doppelt so lang wie die Sekundärspule genommen; seine Dicke beträgt etwa $^1/_{20}$ bis $^1/_{10}$ seiner Länge (dieses Verhältnis ergibt nach einer Rechnung von Lord Rayleigh die günstigste Wirkung). Die Primärwicklung P, vom Eisenkern durch eine dünne Isolierschicht (Papier, Seide) getrennt, besteht aus wenigen Lagen dicken Drahtes; vielfach sind die Enden der einzelnen Lagen zu besonderen Klemmen geführt, so daß man durch Verwendung einzelner oder mehrerer parallel oder in Serie geschalteter Lagen die primäre Windungszahl der vorhandenen Betriebsart (Gleich- oder Wechselstrom, Wehneltunterbrecher) und Spannung anpassen kann. Die Sekundärwicklung S ist von der Primärwicklung besonders gut isoliert, meist durch ein Hartgummirohr R. Sie besteht aus sehr vielen Windungen (bis zu 200 000, Drahtlänge bis über 100 km) dünnen Drahtes. Außen und an den Köpfen wird die Wicklung gewöhnlich mit Isoliermasse umgossen, in der auch meist die Sekundärklemmen befestigt werden. Um Funkenübergänge („Durchschläge") innerhalb der Wicklung zu vermeiden, unterteilt man sie in mehrere in Serie geschaltete Teilspulen, so daß auf jede Spule nur ein Bruchteil der vom Induktor erzeugten Spannung entfällt; neuerdings stellt man die Teilspulen in Form von dünnen Scheiben (Sektionen) von nur einigen Millimetern Dicke her, die in großer Zahl abwechselnd mit Scheiben aus Isolationsmaterial nebeneinander auf die Primärspule aufgereiht werden. Ritchie und Miller nehmen die Scheiben sogar nur eine Drahtdicke stark. Die idealste Wicklungsart ist wohl die von Klingelfuß (Fig. 30), bei der ebenfalls jede


Fig. 30.

Scheibe nur eine Drahtlage enthält, außerdem aber die Dicke der isolierenden Schicht zwischen zwei Scheiben in dem Maße, wie die Potentialdifferenz zwischen ihnen wächst, zunimmt; die ganze Wicklung wird fortlaufend ausgeführt, so daß die besonders schwer zu isolierenden Verbindungsstellen fortfallen. Diese Wicklungsart besitzt auch die geringste Eigenkapazität.

Das Uebersetzungsverhältnis (= Verhältnis der Windungszahlen) variiert bei Induktoren für größere Funkenlänge (15 bis 100 cm) nicht sehr und beträgt gewöhnlich etwa 100 bis 200, bisweilen auch bis 500.

3c) Unterbrecher. α) Mechanische Unterbrecher. Die verbreitetste Art von Unterbrechern ist, wenigstens für kleinere Leistungen, der oben beim Induktionsapparat beschriebene Hammerunterbrecher, der auch für Funkeninduktoren viel verwendet wird, oft als besonderer Apparat mit eigenem Elektromagneten.

Von den Abarten des Hammerunterbrechers ist vor allem wichtig der Deprezunterbrecher (Fig. 31); bei diesem ist der Hammer ersetzt durch den um die Achse A drehbaren eisernen Balken B; eine Feder f hält in der Ruhestellung den Kontakt C geschlossen. E ist der Eisenkern des Induktors oder eines besonderen Elektromagneten. Der Vorteil dieses Unterbrechers ist einerseits der, daß die Federspannung (durch die Schraube S_2) regulierbar ist, andererseits, daß der Balken keine ausgesprochene Eigenschwingung hat und deshalb die Unterbrechungszahl in viel weiteren Grenzen dem vorhandenen Bedürfnis angepaßt werden kann.

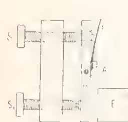

Fig. 31.


Fig. 32.

[1]) Man hat auch versucht, Induktoren mit nahezu geschlossenem Eisenkern (rechteckiger Ring, unterbrochen durch Luftspalt) zu bauen („Funkentransformatoren" von Klingelfuß). Dem Vorteil geringen magnetischen Widerstandes steht der Nachteil der schwierigeren Isolation der Sekundärspule gegen den Eisenkern gegenüber.

Eine weitere Verbesserung des Hammerunterbrechers zeigt schematisch Figur 32: hier sitzt das Kontaktplättchen p nicht an der Feder f_1 des Hammers, sondern an einer besonderen Feder f_2; der Kontakt zwischen s und p wird erst geöffnet, wenn der Hammer schon eine gewisse Geschwindigkeit erreicht hat; so wird eine sehr plötzliche, stoßweise Oeffnung erreicht, wodurch der Oeffnungsfunke verringert wird. Nach diesem Prinzip sind der Carpentiersche „rupteur atonique“ und der Levysche „Vrilunterbrecher“ gebaut.

Für höhere Primärspannungen setzen manche Konstrukteure den ganzen Unterbrecher unter Oel; auch rotierende Unterbrecher, bei denen der Kontakt zwischen einer Bürste und einem rotierenden, abwechselnd mit leitenden und nicht leitenden Segmenten besetzten Zylinder, ähnlich wie bei einem Dynamokommutator, hergestellt wird, sind mit Erfolg angewandt worden.

Während bei den bisher beschriebenen Unterbrechern der Stromschluß zwischen festen Kontakten erfolgt, verwendet man bei größeren Leistungen fast ausschließlich Quecksilberkontakte. Hierher gehören die, namentlich früher, viel verwendeten Quecksilbertauchunterbrecher, bei denen der Kontakt durch einen in Quecksilber eintauchenden Stift bewirkt wird; die periodische Auf- und Abbewegung des Stiftes wird entweder, wie bei dem in Figur 33 dargestellten Foucault-



Fig. 33.

unterbrecher, durch einen Mechanismus nach Art des Neefschen Hammers, oder durch einen Elektromotor bewirkt. Um den Lichtbogen zu verringern und Oxydation des Quecksilbers zu vermeiden, wird auf letzteres Alkohol gegossen. Grimsehl verwendet zur Betätigung des Kontaktes die vibrierende Zunge einer durch Druckwasser betriebenen Zungenpfeife. Tauchunterbrecher haben einerseits den Vorteil eines guten und sicheren Kontaktes durch das Quecksilber, sowie einer schnellen Unterbrechung, weil der Stift im Momente der Unterbrechung schon eine beträchtliche Geschwindigkeit hat; andererseits sind sie nur für geringe Unterbrechungszahlen geeignet, weil sonst Wellen auf der Quecksilberoberfläche und mitgerissene Quecksilbertropfen die Stromöffnung unregelmäßig machen.

Einen erheblichen Fortschritt diesen Arten von Unterbrechern gegenüber stellen die Quecksilberstrahl- oder Turbinenunterbrecher dar, die von Boas eingeführt wurden. Die ursprüngliche Boassche Konstruktion zeigt schematisch Figur 34a: In das am Boden eines Metallgefäßes befindliche Quecksilber Hg taucht die Turbine T, die sich in schneller Rotation um ihre vertikale Achse befindet, ein und saugt das Quecksilber an; oben tritt es unter der Wirkung der Zentrifugalkraft aus der Düse D in Form eines horizontalen feinen Strahles wieder aus. Der Strahl trifft auf den feststehenden, mit Aussparungen versehenen, isolierten Metallring R und schließt und öffnet abwechselnd dadurch den Strom. Die Unterbrechungen erfolgen unter Alkohol (bisweilen auch Petroleum oder Leuchtgas), mit dem das Gefäß oberhalb des Quecksilbers gefüllt ist. Die Turbinenunterbrecher zeichnen sich durch sehr schnelle, sichere Stromunterbrechung aus; sie liefern die höchsten Unterbrechungszahlen (bis mehrere 100 pro Sekunde) und sind bei den größten Leistungen verwendbar.

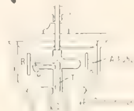


Fig. 34a.



Fig. 34b.

Das Prinzip des Quecksilberstrahlunterbrechers ist von einer großen Anzahl anderer Konstrukteure mit mehr oder weniger erheblichen Aenderungen verwendet worden; erwähnt sei der Unterbrecher von Levy, bei dem der Strahl im Raume feststeht und der Ring R rotiert; die Aussparungen des Ringes sind dreieckförmig (Fig. 34b), und durch Verstellung der gegenseitigen Höhe von Ring und Strahl kann die Stromschlußdauer unabhängig von der Unterbrechungszahl geändert werden.

Der einzige Nachteil der Quecksilberstrahlunterbrecher ist der, daß die Quecksilbertröpfchen, in die der Strahl beim Auftreffen auf den Ring R zerspritzt, zum Teil so fein sind, daß sie nicht wieder zusammenfließen, sondern mit der Flüssigkeit, in der die Unterbrechung erfolgt, eine schlammartige Masse bilden, die von Zeit zu Zeit entfernt und durch frisches Quecksilber ersetzt werden muß. Man hat deshalb das Prinzip des Strahles bei den neueren Konstruktionen von rotierenden Quecksilberunterbrechern wieder verlassen. Als Repräsentant dieser Apparate sei der „Rotax“-Unterbrecher

genannt, dessen Wirkungsweise aus der schematischen Figur 35 hervorgeht: In dem kugelförmigen, um seine senkrechte Achse in schnelle Drehung versetzten Gefäß G befindet sich ein wenig Quecksilber Hg, das bei der Rotation durch die Zentrifugalkraft die Form eines Ringes annimmt; in diesen Ring taucht ein um eine vertikale, exzentrische Achse drehbares Rädchen r ein, das von dem Quecksilberring mitgenommen wird und durch an seinem Umfang angeordnete Kontaktstücke den Strom abwechselnd schließt und öffnet.



Fig. 35.

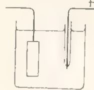


Fig. 36.

β) Elektrolytische Unterbrecher. Der älteste Unterbrecher dieser Art ist der von Wehnelt angegebene: Dieser schaltete in den Primärkreis eine elektrolytische Zelle (Fig. 36) mit einer Anode von sehr kleiner Oberfläche (ein kurzes Stück Platindraht, in ein Glasrohr eingeschmolzen) ein und beobachtete, daß dann der Strom von selber unter lautem Geräusch periodisch unterbrochen wurde und in der Sekundärspule sehr starke Induktionswirkungen auftraten. Als Elektrolyt erwies sich am geeignetsten verdünnte Schwefelsäure, doch erhält man die Erscheinung auch mit anderen Elektrolyten, z. B. Kupfersulfatlösung mit einem Kupferstift als Anode. Die Erscheinung tritt nur auf, wenn im Kreise eine genügende Selbstinduktion vorhanden ist, und wenn die „aktive Elektrode", d. i. die Elektrode mit kleiner Oberfläche, Anode ist. Die Zahl der Unterbrechungen pro Sekunde hängt von den Konstanten des Primärkreises und der Oberfläche der aktiven Elektrode ab; sie ist um so größer, je größer die Batteriespannung E_0, je kleiner Selbstinduktion und Widerstand des Primärkreises und je kleiner die Elektrodenoberfläche ist.

Die Unterbrechungen kommen dadurch zustande, daß sich um die aktive Elektrode eine Gasschicht bildet, welche die Elektrode von der umgebenden Flüssigkeit trennt; fast im gleichen Augenblicke, in dem die Trennung und damit die Unterbrechung erfolgt, wird die Gashülle explosionsartig auseinander geschleudert, die Flüssigkeit berührt wieder die Elektrode, schließt den Strom und das Spiel beginnt von neuem.

Grundlegend für die Wirkungsweise des Unterbrechers ist die Tatsache, daß mit einer Elektrolytlösung als Kathode ein Lichtbogen nicht erhalten werden kann; da der Unterbrechungsfunke ein Lichtbogen ist und er hier zwischen Elektrolyt als Kathode und Metall als Anode auftreten müßte, folgt, daß hier ein Unterbrechungsfunke sich überhaupt nicht ausbilden kann. Infolgedessen nimmt der Primärstrom außerordentlich rapide auf Null ab; so erklärt sich die starke Induktionswirkung bei einem mit Wehneltunterbrecher betriebenen Induktor; gleichzeitig findet die Unipolarität der Wirkung ihre Erklärung, denn zwischen Flüssigkeit als Anode und Metall als Kathode kann sehr wohl ein Lichtbogen, also auch der Unterbrechungsfunke auftreten; in der Tat beobachtet man, wenn man die aktive Elektrode zur Kathode macht, daß zwar Unterbrechungen auftreten, daß die Elektrode aber sehr bald infolge des Lichtbogens glühend wird und abschmilzt.

Die Gasblase entsteht nach der heute wohl allgemein angenommenen Simonschen Theorie im wesentlichen auf thermischem Wege: In unmittelbarer Nähe der aktiven Elektrode ist der Widerstand der Strombahn wegen ihres geringen Querschnittes sehr groß; durch Joulewärme wird diese Stelle so stark erhitzt, daß die Flüssigkeit dort verdampft. Auf Grund dieser Vorstellung nahm Simon an, daß zu einer Unterbrechung beim selben Unterbrecher stets die gleiche Stromarbeit erforderlich sei und konnte aus dieser Annahme Formeln für Unterbrechungszahl und Stromstärke ableiten, welche durch die Erfahrung bestätigt wurden.

Durch seine Theorie wurde Simon zu der Konstruktion eines neuen Unterbrechers, des „Lochunterbrechers", geführt, den schematisch Figur 37 darstellt: Das den

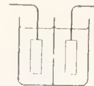


Fig. 37.

Elektrolyten enthaltende Gefäß ist durch eine Scheidewand in zwei Teile geteilt, deren jeder eine der Elektroden enthält; die Scheidewand hat ein kleines Loch, durch welches der ganze Strom hindurch muß. An dieser Einschnürungsstelle tritt die starke Entwickelung von Joulewärme auf, genau wie beim Wehneltunterbrecher, und bewirkt Verdampfung der Flüssigkeit und damit Unterbrechung des Stromes.

Die praktische Ausführung eines Wehnelt- und eines Simonunterbrechers zeigen Figur 38 und 39. Der Wehneltunterbrecher (Fig. 38) wird fast stets mit veränderlicher

Stiftlänge ausgeführt (vertikal durch Schraube verschiebbarer Platindraht tritt durch enge Bohrung in Porzellanrohr), damit man die Oberfläche der aktiven Elektrode und dadurch Stromstärke und Unterbrechungszahl



Fig. 38.



Fig. 39.

ändern kann. Beim Simonunterbrecher dient als Scheidewand ein unten geschlossenes, reagenzglasförmiges Porzellanrohr, welches im Boden ein oder meist mehrere Löcher enthält.

Der Wehneltunterbrecher ist verwendbar für Batteriespannungen zwischen 30 und 120 Volt; er läßt sich auch bei niedrigeren Spannungen verwenden, wenn man den Elektrolyten erwärmt. Der Simonunterbrecher arbeitet bei Spannungen von 50 bis 220 Volt; sein Hauptanwendungsgebiet liegt oberhalb 120 Volt.

Der Verlauf des Primärstromes unterscheidet sich bei den elektrolytischen Unterbrechern in einem wesentlichen Punkte von demjenigen bei mechanischen Unterbrechern: Die „verlorene Zeit" ist praktisch Null, der Strom steigt unmittelbar nach der Unterbrechung wieder an; die Phasen der Oeffnung und Schließung sind nicht mehr getrennt, sondern der Anstieg des Primärstromes erfolgt schon, während der sekundäre Oeffnungsstrom noch fließt. Beide beeinflussen sich gegenseitig in dem Sinne, daß der Sekundärstrom schneller abnimmt, der Primärstrom schneller ansteigt; der Induktionsfluß ändert sich dabei nur wenig. Insbesondere ist, wenn die Sekundärspule durch einen Funken oder eine Röntgenröhre belastet ist, bei Beginn der Schließungsperiode der Sekundärkreis noch geschlossen und dadurch die scheinbare Selbstinduktion des Primärkreises verkleinert; der Strom steigt so viel schneller an, als bei einem mechanischen Unterbrecher. So erklären sich die mit den elektrolytischen Unterbrechern erreichten hohen Unterbrechungszahlen.

Figur 40 zeigt den Verlauf von Primärstrom J_1, Sekundärstrom J_2 und Induktionsfluß Φ; von der Stelle a ab, an welcher der Funke erlischt, steigt der Primärstrom

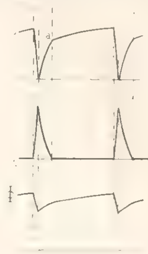


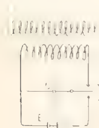
Fig. 40.

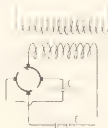
wieder langsamer an, nämlich mit der dem offenen Sekundärkreise entsprechenden Geschwindigkeit.

γ) Unterbrecher für Wechselstrom. Der von der Kurvenform des technischen Wechselstromes so ganz verschiedene Verlauf der Sekundärspannung bei Betrieb mit unterbrochenem Gleichstrom eignet sich für viele Zwecke, insbesondere für Röntgenbetrieb, bei dem die hohe, nur einen kleinen Teil der Periode andauernde Oeffnungsspannung und die sehr viel geringere Höhe der Schließungsspannung sehr erwünscht ist, viel besser als der sinusartige Verlauf technischen Wechselstromes. Man hat aus diesem Grunde sogar besondere Wechselstrommaschinen für die Speisung von Röntgeninduktoren gebaut, deren Spannungskurve derjenigen des mit unterbrochenem Gleichstrom betriebenen Induktors ähnelt (Boas). Einfacher ist es, entweder den Wechselstrom in Gleichstrom umzuwandeln und mit einem der oben beschriebenen mechanischen oder elektrolytischen Unterbrecher zu arbeiten, oder aber den Induktor mit Wechselstrom zu betreiben und durch einen besonderen Unterbrecher den Primärstrom im Augenblicke seiner größten Stärke zu unterbrechen. Hierzu ist der Simonsche Lochunterbrecher ohne weiteres geeignet, weil seine Unterbrechungszahl weit größer gemacht werden kann als die Periodenzahl des technischen Wechselstromes; es erfolgen dann in jeder Periode mehrere Unterbrechungen. Der Wehneltunterbrecher eignet sich wegen seiner Unipolarität nicht gut. Mechanische Unterbrecher für Wechselstrom müssen synchron mit dem den Induktor speisenden Wechselstrom arbeiten; man erreicht das entweder durch Anordnungen nach Art des Hammerunterbrechers, oder durch rotierende Unterbrecher, welche von einem Synchronmotor angetrieben werden.

3d) Spezialanordnungen. Wir sahen oben, daß der Primärkondensator eigentlich schädlich ist, weil er die Sekundärspannung herabsetzt; wenn man Mittel findet, den primären Oeffnungsfunken ohne Verwendung eines Kondensators zu vermeiden, so muß man wesentlich höhere Sekundärspannungen erhalten können. Ein Beispiel dafür bilden der Wehnelt- und Simon-Unterbrecher, bei denen stets der Kondensator weggelassen wird und in der Tat sehr hohe Spannungen erreicht werden. Lord Rayleigh zeigte, daß auch eine genügend schnelle mechanische Trennung der Kontakte, die er erzielte, indem er einen in die Primärleitung eingeschalteten Draht mit einer Gewehrkugel durchschoß, ohne Kondensator eine wesentlich größere Wirkung ergibt als ein gewöhnlicher Unterbrecher mit Kondensator. Dessauer erreicht mit einem ähnlichen Verfahren, bei dem die Unterbrechung durch explosionsartige Verdampfung eines in die Leitung eingeschalteten dünnen Metalldrahtes unter dem Einfluß der Stromwärme erfolgt, eine derart intensive Wirkung, daß eine Röntgenröhre mit einer einzigen Entladung eine vollkommen ausexponierte Röntgenaufnahme liefert; es ist ihm auf diese Weise gelungen, Röntgenmomentaufnahmen und Röntgenkinematogramme herzustellen.

In einer Reihe von anderen Anordnungen hat man versucht, den Oeffnungsfunken ganz zu vermeiden. Als älteste dieser Anordnungen ist die von Norton und Lawrence zu nennen; bei dieser (Fig. 41) wird ein Kondensator mittels eines rotierenden Umschalters abwechselnd auf die Netzspannung E aufgeladen und durch die Primärwicklung des Induktors entladen. Da im Momente der Unterbrechung durch die Kontakte kein Strom fließt, erhält man hier in der Tat eine vollkommen funkenlose Unterbrechung. Die dem Induktor pro Entladung zugeführte Energie ist gleich der im Kondensator aufgespeicherten $\frac{1}{2} CE_0^2$. Es ist schwer, hierbei größere Energiebeträge zu erreichen, z. B. braucht man bei einer Batteriespannung von 100 Volt zur Aufspeicherung von 1 Wattsekunde die enorm große Kapazität von 200 Mfd.


Fig. 41.


Fig. 42.

Eine ähnliche Anordnung mit Verwendung eines Hammerunterbrechers rührt von Tesla her. Das einzige derartige System, welches praktische Erfolge aufzuweisen hat, ist der „Grissonresonator“; hier kommen in der Tat Kapazitäten von mehreren hundert Mfd. in Gestalt von elektrolytischen Kondensatoren (vgl. den Artikel „Elektrische Ventile“) zur Anwendung, außerdem wird der Kondensator nicht einfach entladen, sondern, wie aus dem Schema Figur 42 hervorgeht, auf entgegengesetztes Potential umgeladen; dadurch wird die verfügbare Energie auf das Vierfache erhöht.

Literatur. *Allgemeine Lehr- und Handbücher:* **Arnold,** *Die Wechselstromtechnik, Bd.* **II** *(Transformatoren), 2. Aufl. Berlin 1910.* — **Thomälen,** *Lehrbuch der Elektrotechnik, 5. Aufl. Berlin 1912.* — **Kittler,** *Allgemeine Elektrotechnik, Bd.* **II.** *Stuttgart 1909.*

Spezialwerke: **G. Kapp,** *Transformatoren für Wechselstrom und Drehstrom, 3. Aufl. Berlin 1907.* — **H. Armagnat,** *La bobine d'induction. Paris 1905.* — **E. Ruhmer,** *Funkeninduktoren. Berlin 1913.*

Originalabhandlungen: Vollständiges Literaturverzeichnis über Induktoren und Unterbrecher bis 1904 bei **Armagnat;** *dort auch einiges über die Geschichte der Induktoren. Aeltere Literatur über Induktoren und Transformatoren bis 1888 bei* **Uppenborn,** *Geschichte der Transformatoren. München 1888.* — *Wichtige ältere und neuere Arbeiten:* **Fizeau,** *Compt. Rend.* **36,** *418, 1853.* — **Colley,** *Zur Theorie des Ruhmkorffschen Apparates, Wied. Ann.* **44,** *109—132, 1891.* — **Walter,** *Ueber die Vorgänge im Induktionsapparat, Wied. Ann.* **62,** *300—3[illegible] 1897.* — **T. Mizuno,** *Ueber die Funktion des Kondensators beim Induktor, Phil. Mag. (5)* **45,** *447, 1898.* — **H. Armagnat,** *Ueber die Theorie des Induktors, Eclairage électr.* **22,** *121, 1900.* — **Lord Rayleigh,** *Ueber den Induktor, Phil. Mag. (6)* **2,** *581, 1901.* — **Fr. Klingelfuss,** *Untersuchungen an Induktoren an Hand der Bestimmungsstücke derselben, Ann. d. Phys. (4)* **5,** *837—871, 1901.* — **H. Schnell,** *Untersuchungen am Funkeninduktor mit Quecksilberunterbrecher, Ann. d. Phys. (4)* **21,** *1—22, 1906.* — **O. M. Corbino,** *Theoretische und experimentelle Untersuchungen an der Ruhmkorffschen Spule, Atti dell'Ass. Elettrot. Ital. 1907.* — **M. La Rosa,** *Ueber die Funktion des Kondensators beim Induktor, N. Cim. (5)* **14,** *Juli-August 1907.* — **A. Wehnelt,** *Ein elektrolytischer Stromunterbrecher, Wied. Ann.* **68,** *233—272, 1899.* — **H. Th. Simon,** *Das Wirkungsgesetz des Wehneltunterbrechers, Wied. Ann.* **68,** *273 bis 293, 1899.* — **Derselbe,** *Ueber einen neuen Flüssigkeitsunterbrecher, Wied. Ann.* **68,** *860—868, 1899.* — **P. Ludewig.** *Ueber die sogenannten elektrolytischen Stromunterbrecher, Diss. Göttingen 1907 u. Ann. d. Phys. (4),* **25,** *467—505, 1908.* — **G. Seibt.** *Ueber Resonanzinduktoren und ihre Anwendung in der drahtlosen Telegraphie, Elektrot. ZS.* **25,** *276—281, 1904.* — **J. Bethenod.** *Ueber den Resonanztransformator, Jahrb. d. drahtl. Tel.* **1,** *534—570, 1908.*

H. Busch.

Transgression.

Uebergreifende Lagerung der Gesteinsschichten. Dadurch hervorgebracht, daß das Meer während der Ablagerung der betreffenden Schichten immer weiter über das Land vordrang. Vgl. den Artikel „Schichtenbau".

Translation.

Vgl. den Artikel „Kristallphysik".

G. Pätz'sche Buchdruckerei Lippert & Co. G. m. b. H., Naumburg a. d. S.